



Titre: Détermination de l'approvisionnement en sciage dans la fabrication
Title: de panneaux lamellés-collés

Auteur: Joël Laprise
Author:

Date: 2010

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Laprise, J. (2010). Détermination de l'approvisionnement en sciage dans la
Citation: fabrication de panneaux lamellés-collés [Master's thesis, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/448/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/448/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Bruno Agard
Advisors:

Programme: Génie Industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉTERMINATION DE L'APPROVISIONNEMENT EN SCIAGE DANS LA
FABRICATION DE PANNEAUX LAMELLÉS-COLLÉS

JOËL LAPRISE

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

SEPTEMBRE 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉTERMINATION DE L'APPROVISIONNEMENT EN SCIAGE DANS LA FABRICATION
DE PANNEAUX LAMELLÉS-COLLÉS

présenté par : LAPRISE Joël

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. RIVETTE Mickaël, ing., Ph. D., président

M. AGARD Bruno, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à me soutenir tout au long de mon projet de maîtrise. Particulièrement, je tiens à remercier :

M. Bruno Agard, mon directeur de recherche, pour avoir su m'accompagner, me guider et m'encourager du début à la fin. Un énorme merci pour m'avoir accepté comme étudiant et pour le financement inopiné qu'il m'a accordé.

M. Claude Dupuis pour m'avoir accordé un projet dans un domaine qui me passionne et pour m'avoir guidé durant le projet.

MM. Denis Veilleux, Christian Giroux et Stéphane Boutin pour le temps et la patience qu'ils m'ont consacrés pour me permettre de comprendre leurs tâches, responsabilités et préoccupations dans leur travail.

MM. Michel Proulx et Richard Lessard de *Bleu Tech Montréal* pour l'emploi à temps partiel et les accommodements.

Ma compagne Eve Paquette pour sa présence à mes côtés et ses conseils de maître lors de la réalisation du projet et de la rédaction de ce mémoire.

Mon ami René Bernaert pour les commentaires et les révisions.

Ce mémoire fut une expérience d'une grande richesse intellectuelle. Il m'ouvre à présent la porte à de nouveaux horizons.

Je souhaite une bonne lecture à ceux et celles qui parcourront ce mémoire.

RÉSUMÉ

Depuis l'an 2000, l'industrie du meuble au Québec doit composer avec de nouvelles perturbations qui menacent la survie de plusieurs entreprises. Ainsi, la concurrence venant de pays émergent, la vigueur du dollar canadien par rapport au dollar américain et les contraintes d'approvisionnement en bois feuillus sont devenues des préoccupations majeures (Beauregard et al., 2004; Lihra et al., 2009; MRNF, 2003).

Des pistes de solutions suggérées par des spécialistes de l'industrie préconisent l'innovation et les technologies pour permettre aux entreprises de passer au travers de ces perturbations (Crissey, 2003; Deschênes et al., 2009).

Parmi les activités de la fabrication de meubles pouvant être l'objet d'innovation et de technologie, il y a la fabrication de panneaux lamellés-collés. La revue de la littérature a montré que des outils informatiques (Caron, 2001; Thomas & Weiss, 2006) existent pour optimiser l'approvisionnement en sciage dans la fabrication de panneaux lamellés-collés. Toutefois, ils ne sont pas applicables au procédé de tous les fabricants, dont le commanditaire. Quant aux technologies de détection des défauts automatique, elles représentent une avenue dispendieuse et complexe à implanter, tout en n'assurant pas la détection de l'ensemble des défauts.

Ainsi, l'objectif de cette étude a été de développer un nouvel outil d'optimisation de l'approvisionnement en sciage dans la fabrication de panneaux lamellés-collés. Trois étapes ont permis d'atteindre l'objectif: le développement d'un outil de simulation de procédés, le développement d'un modèle mathématique d'optimisation et le développement de l'outil d'optimisation de l'approvisionnement.

L'outil développé a permis d'optimiser l'approvisionnement en bois en utilisant un nouveau concept représenté par les profils de composants. Ces profils, dont chacun est associé à une classe

de sciages disponibles pour la transformation, simulent le procédé de fabrication en spécifiant les quantités de composants attendues pour une combinaison de sciages donnée.

Un résultat intéressant est la possibilité d'avoir des sciages ayant une classe NHLA dans la combinaison optimale. Ainsi, un fabricant ayant l'habitude de faire un classement interne (en plus de classement commercial NHLA) de tous les sciages achetés voit ici l'opportunité d'éviter cette activité pour une partie des sciages. Du coup, des ressources peuvent être épargnées.

Aussi, en enlevant la contrainte visant les quantités de sciages disponibles pour chacune des classes, il est possible d'obtenir une solution optimale donnant de précieuses informations quant à la gestion des stocks de sciages. En effet, le fabricant peut comparer les classes requises pour la solution optimale avec les classes en stock et voir si des correctifs doivent être apportés quant à la gestion des stocks de sciages.

Finalement, le fabricant peut apprécier les conséquences du choix d'une stratégie de gestion des stocks finaux (il y en a plusieurs) en adaptant l'outil. Ainsi, plusieurs simulations peuvent être faites avec des stratégies différentes et permettre au fabricant de choisir celle lui convenant le mieux.

ABSTRACT

Since 2000, the furniture industry in Quebec has to deal with new turmoils that threaten the survival of many companies. Thus, competition from emerging countries, the stronger Canadian dollar versus the U.S. dollar and supply constraints in hardwoods have become major concerns (Beauregard et al. 2004; Lihra et al. 2009; MRNF 2003).

Some suggested solutions by industry experts advocate innovation and technology to help businesses get through these concerns (Crissey, 2003; Deschênes et al., 2009).

Among the furniture manufacturing's activities that could be the subject of innovation and technology, there is the manufacture of solid wood panels. For this activity, there are recent technological tools developed to optimize the supply of lumber (Caron, 2001, Thomas & Weiss, 2006). However, based on the sponsor of this study which is a solid wood panels maker, they are not always applicable.

Thus, the objective of this study is to develop a new optimization tool for the supply of lumbers for the manufacture of solid wood panels. Three stages were done to achieve the goal: development of a rough mill computer simulator, development of a mathematical model of optimization and development of the tool for optimizing the supply of lumbers.

The tool was created to allow optimization in the supply of lumber. Furthermore, it can optimize with a limited number of classes in the solution. Also, some valuable information on inventory management can be obtained. Finally, the effects of alternative strategies for the management of ending stocks of components can be assessed.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 NOTIONS DE BASE.....	6
2.1 La fabrication de meubles au Québec	6
2.1.1 Les différentes transformations du bois	6
2.1.2 Approvisionnement	8
2.1.3 Première transformation.....	10
2.1.4 Deuxième transformation.....	15
2.2 Le commanditaire : un exemple d'acteur dans l'industrie	21
2.2.1 Le commanditaire.....	21
2.2.2 Division de panneaux lamellés-collés	21
2.2.3 Procédé de fabrication du commanditaire.....	22
2.3 Unités de mesure propre à l'industrie du bois.....	24
CHAPITRE 3 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	25
3.1 Logiciels de simulation de procédés de transformation	25
3.2 Les modèles d'optimisation de combinaisons de sciages	27
3.3 Technologies de détection de défauts dans le bois.....	31
3.4 Synthèse	32
CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE.....	34
CHAPITRE 5 CONTRIBUTIONS.....	36
5.1 Outil de simulation de procédés de fabrication de panneaux lamellés-collés.....	36
5.1.1 Description de l'échantillon de sciages.....	39
5.1.2 Transformation des sciages de l'échantillon	39
5.2 Modèle d'optimisation	42
5.3 Outil d'optimisation de l'approvisionnement.....	44

5.3.1	Hypothèses du modèle	44
5.3.2	Organigramme.....	45
CHAPITRE 6 CAS D'ÉTUDE.....		53
6.1	Profils de composants des classes de sciages.....	53
6.2	Le carnet de commandes	54
6.3	Stocks initiaux	55
6.4	Coûts de stockages	55
6.5	Coûts de production	56
6.6	Résultats de l'exercice.....	56
6.7	Limitation du nombre de classes	57
6.8	Sans limite de sciages disponibles	59
6.9	Changement de stratégie pour les coûts de stockage	60
CHAPITRE 7 CONCLUSION		63
7.1	Principaux résultats	63
7.2	Limites de l'étude.....	64
7.2.1	Profils de composants.....	64
7.2.2	Coût de production	64
7.2.3	Simulation du procédé.....	65
7.2.4	Valeurs initiales des variables indépendantes	65
7.2.5	Solutions sous-optimales.....	67
7.3	Perspectives.....	67
7.3.1	Profils de composants.....	68
7.3.2	Combinaisons de sciages.....	68
7.3.3	Validation expérimentale	68
7.3.4	Carnet de commandes	69
7.3.5	Simulation de procédé.....	69
GLOSSAIRE		70
BIBLIOGRAPHIE		72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Facteurs ayant un impact sur le rendement (Buehlmann, 1998).	3
Tableau 2.1. Principaux critères de classement des règles NHLA (Bouffard, 2005).	12
Tableau 2.2. Règles de classement basées sur la couleur.	14
Tableau 2.3. Procédé de transformation typique dans la fabrication de meubles.	16
Tableau 2.4. Exemple de règles maison.	17
Tableau 2.5. Classement maison utilisé par le commanditaire, version de mars 2010.	23
Tableau 5.1. Caractéristiques des sciages de l'échantillon de l'étude.	39
Tableau 5.2. Exemple de données acquises sur un sciage.	40
Tableau 5.3. Profils de composants créés à partir de l'échantillon.	41
Tableau 5.4. Exemple d'un carnet de commandes.	47
Tableau 5.5. Exemple de stocks initiaux de composants.	47
Tableau 5.6. Exemple de coûts de stockages des composants	48
Tableau 5.7. Exemple de coûts de production.	49
Tableau 5.8. Minimums et maximums pour les quantités de sciages à transformer.	50
Tableau 6.1. Profils de composants utilisés dans l'exercice.	54
Tableau 6.2. Carnet de commandes de <i>Buehlmann</i>	54
Tableau 6.3. Carnet de commandes de l'exercice.	55
Tableau 6.4. Résultats de l'exercice.	56
Tableau 6.5. Points saillants de l'exercice.	57
Tableau 6.6. Résultats de l'exercice visant à limiter le nombre de classes.	58
Tableau 6.7. Points saillants de l'exercice visant à limiter le nombre de classes.	58
Tableau 6.8. Résultats de l'exercice sans limite de sciages disponibles.	59
Tableau 6.9. Points saillants de l'exercice sans limite de sciages disponibles.	59
Tableau 6.10. Structure en escalier des coûts de stockage.	60
Tableau 6.11. Résultats de l'exercice avec des coûts de stockage en escalier.	61
Tableau 6.12. Points saillants de l'exercice avec des coûts de stockage en escalier.	61
Tableau 7.1. Résultats avec des valeurs de départ nulles pour les variables indépendantes.	66
Tableau 7.2. Résultats avec des valeurs très grandes pour les variables indépendantes.	66
Tableau 7.3. Comparaison des points saillants des exercices.	67

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Intégration de l'industrie de la transformation du bois (MRNF, 2010).	7
Figure 2.2. Étapes de transformation des meubles en bois (MDEIE, 2007).	8
Figure 2.3. Le tronçonnage, une activité liée à l'approvisionnement. Photo : Jacques Laprise	9
Figure 2.4. Transformation des billes en sciages (Deschênes, 1986).	10
Figure 2.5. Illustration d'un nœud sur un sciage. Photo : Philipp Zinger.	11
Figure 2.6. Bois d'aubier et bois de cœur. Photo : MPF.	13
Figure 2.7. Illustration d'un éboutage et d'un délignage.	18
Figure 2.8. Exemple d'un panneau lamellé-collé. Photo : Eve Paquette	19
Figure 3.1. Fenêtre principale du logiciel <i>ROMI-3</i>	26
Figure 4.1. Structure de l'outil d'optimisation.	34
Figure 5.1. Exemple d'un profil de composants.	36
Figure 5.2. Schéma du modèle mathématique.	42
Figure 5.3. Organigramme du modèle.....	46
Figure 5.4. Paramètres du solveur utilisés pour l'étude.	51
Figure 5.5. Tableau de bord de l'outil d'optimisation.....	52

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CRIQ	Centre de recherche industriel du Québec
NHLA	<i>National Hardwood Lumber Association</i>
O2A	Optimiseur deux axes (logiciel)
PMP	Pied mesure de planche
PMS	Pied mesure de surface
S1F	Bois sain sur une face (<i>Sound 1 Face</i>)
S2F	Bois sain sur les deux faces (<i>Sound 2 Faces</i>)
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'exploitation forestière au Québec figure parmi les activités économiques des premiers immigrants venus du vieux continent. Vu l'immense ressource en bois, cette industrie a grandi et pris de l'importance avec le temps, les innovations technologiques et la mondialisation des marchés pour constamment occuper une place prépondérante dans l'économie québécoise. Aujourd'hui, l'industrie forestière, sous toutes ses formes, représente 117 000 emplois, près de 5 G\$ en traitement et salaires et 28 G\$ en revenu (MRNF, 2010). Et parmi les formes de l'industrie, il y a l'industrie du meuble qui, avec ses 1 752 établissements, fournit 30 000 emplois principalement en Montérégie, en Chaudière-Appalaches et à Montréal (MDEIE, 2007).

La croissance de l'industrie du meuble au Québec a été particulièrement marquée de la révolution industrielle de la fin du 19^e siècle jusqu'aux années 60 grâce à une main-d'œuvre et à une matière première peu coûteuses et abondantes. À ce moment, ces deux conditions favorables commencent à se détériorer : la main d'œuvre obtient de meilleurs salaires et de meilleures conditions tandis que la ressource locale se fait rare dû à une exploitation intensive, faisant augmenter les coûts à cause du transport (Lihra, et al., 2009). Au cours des ans, d'autres problèmes sont apparus : envahissement des produits états-uniens dans les années 70, inflation galopante et resserrement du crédit dans les années 1980. Néanmoins, malgré ces fortes perturbations, l'industrie a toujours su s'adapter au marché, malgré de nombreuses faillites (Lihra, et al., 2009).

Depuis l'an 2000, deux nouvelles perturbations sont apparues, « deux facteurs [qui] créent un impact dévastateur sur la compétitivité des fabricants locaux de sorte que de nombreuses usines ferment » (Lihra, et al., 2009). C'est l'arrivée de nouveaux concurrents venant de pays émergent ayant des coûts de production moins élevés et la vigueur du dollar canadien par rapport au dollar américain (Beauregard, et al., 2004; Lihra, et al., 2009).

À ces deux perturbations vient s'ajouter l'approvisionnement en bois qui est aujourd'hui problématique (Beauregard, et al., 2004; MRNF, 2003) :

- une rareté des billes*¹ ou grumes* de qualité supérieure ;
- un coût élevé des essences nobles ;
- une matière recherchée par une industrie en forte croissance ;
- un marché qui s'étend à l'échelle internationale ;
- des exigences accrues en matière de protection de l'environnement.

L'approvisionnement en bois, sa gestion et l'optimisation du rendement matière représentent des enjeux stratégiques pour l'industrie du meuble (MRNF, 2003). « Étant donné la rareté et l'importante valeur des sciages* feuillus, l'impact d'augmenter le rendement en matière et la valeur monétaire des pièces produites est important » (Caron, 2003).

Face à ces difficultés, diverses avenues de solutions s'offrent aux fabricants. Selon Buehlmann, la technologie et l'innovation sont les seules choses qui pourraient sauver l'industrie du meuble états-unienne et, par similitude, canadienne (Crissey, 2003). Dans la même veine, Deschênes et al. (2009) écrivent que « les spécialistes de l'industrie s'entendent pour dire que l'industrie doit exploiter au maximum les outils informatiques permettant l'automatisation et la robotisation des processus. »

Ces processus ou procédés de transformation, dont Deschênes et al. font mention, diffèrent pour le bois feuillu et le bois résineux. Avec quelques exceptions, le bois feuillu est recherché pour ses caractéristiques esthétiques et est alors utilisé dans les produits d'apparence (meubles, planchers), tandis que le bois résineux l'est pour ses caractéristiques mécaniques et entre dans les produits structuraux (charpente, construction) (Deschênes, et al., 2009).

¹ Voir le glossaire pour la définition des mots suivi d'un astérisque (*).

Comme l'esthétisme est recherché dans les meubles, c'est le bois de feuillu qui est essentiellement utilisé. Lors de sa transformation, c'est à la fois la maximisation de la matière et celle de la qualité qui sont recherchées. Une fois les billes transformées en sciages, les défauts visuels et structuraux sont enlevés pour obtenir des composants* qui pourront ensuite faire partie d'escaliers, de meubles ou de planchers (Rancourt, 2004).

La tâche d'élimination des défauts est particulièrement complexe et l'utilisation maximale du bois dépend de plusieurs facteurs. Des auteurs (Anonyme, 1985; C. J. Gatchell, 1985; Wengert & Lamb, 1994) ont étudié ces facteurs et Buehlmann (1998) a en fait un résumé qui est présenté au Tableau 1.1 :

Tableau 1.1. Facteurs ayant un impact sur le rendement (Buehlmann, 1998).

Facteur	Wengert & Lamb (1994)	Gatchell (1985)	Anonyme (1985)
Classe des sciages	Oui	Oui	Oui
Qualité du séchage	Oui	-	Oui
Carnet de commandes	Oui	Oui	Oui
Compétence des opérateurs	Oui	Oui	Oui
Qualité du sciage (<i>Part quality</i>)	Oui	-	Oui
Aménagement de l'usine	Oui	-	Oui
Largeur du trait de scie (<i>Kerf</i>)	Oui	-	-
Pratiques d'usinage (<i>Edging practices</i>)	Oui	-	-
Dimensions du sciage	Oui	Oui	Oui
Cohérence du classement (<i>Consistency</i>)	Oui	Oui	Oui

Les auteurs Wengert et Lamb (1994) ordonnent les facteurs selon une « approximation de leur importance ». Le Tableau 1.1 respectant cet ordre, le facteur le plus important est situé en haut et le moins important en bas. Selon cet ordre, le facteur ayant le plus d'impact est la classe* des

sciages, plus que la qualité du séchage, la nature du carnet de commandes, les habiletés des opérateurs, l'aménagement de l'usine et les autres.

En résumé, deux pistes d'améliorations viennent d'être exposées :

- L'importance de faire face aux problèmes d'approvisionnement en bois de feuillus ;
- L'importance de la qualité (classe) des sciages dans l'approvisionnement d'un procédé de deuxième transformation du bois.

En exploitant ces deux pistes, des solutions pourraient permettre aux fabricants d'affronter la concurrence des pays émergents et la vigueur du dollar canadien pour demeurer compétitifs dans leur marché.

Dans cette optique, les deux pistes ont mené à la question générale de cette étude :

Comment choisir l'approvisionnement optimal en sciage pour la réalisation d'un carnet de commandes dans la fabrication de panneaux lamellé-collé ?

En ayant un approvisionnement optimal, les problèmes liés à l'achat de bois de feuillus sont moins minimisés, en plus de viser directement le facteur influençant le plus le rendement d'un procédé, soit la classe des sciages

La revue de la littérature effectuée a montré que des outils informatiques existent pour optimiser l'approvisionnement en sciage dans la fabrication de panneaux lamellés-collés. Toutefois, ils ne sont pas applicables au procédé de tous les fabricants, dont le commanditaire. Quant aux technologies de détection des défauts automatique, elles représentent une avenue dispendieuse et complexe à implanter, tout en n'assurant pas la détection de l'ensemble des défauts.

Par conséquent, un outil informatique d'optimisation de l'approvisionnement a été développé en trois étapes. D'abord, un outil de simulation d'un procédé de fabrication de panneaux lamellés-collés a été développé. Ensuite, un modèle mathématique a été créé pour optimiser les approvisionnements. Finalement, l'outil d'optimisation a été développé en se servant de l'outil de simulation et du modèle mathématique. Avec cet outil, un cas d'étude a été réalisé.

CHAPITRE 2 NOTIONS DE BASE

La transformation d'un arbre en des composants entrant dans la fabrication de produits finis s'effectue en plusieurs étapes. Ce chapitre présente au lecteur une description de ces étapes pour lui permettre une meilleure compréhension de l'étude. La première section présente les étapes de fabrication de meubles, de la récolte en forêt jusqu'aux produits finis. La deuxième présente le commanditaire de l'étude, qui est un acteur important de l'industrie du meuble au Québec. Finalement, la dernière section présente deux unités de mesure propres à l'industrie forestière et essentielles à la compréhension de l'étude.

2.1 La fabrication de meubles au Québec

Toutes les activités nécessaires à la transformation d'arbres en meubles sont présentes au Québec. Cette section est une présentation de ces activités. D'abord, les différentes transformations du bois sont décrites. Ensuite, chacune de ces transformations est expliquée : l'approvisionnement, la première transformation et la deuxième transformation.

2.1.1 Les différentes transformations du bois

L'industrie de la transformation du bois au Québec comporte plusieurs secteurs d'activités. Ceux-ci sont fortement intégrés dans lesquelles les acteurs s'approvisionnement mutuellement, formant un réseau dédié à alimenter les différents marchés. La Figure 2.1 donne un aperçu de cette intégration.

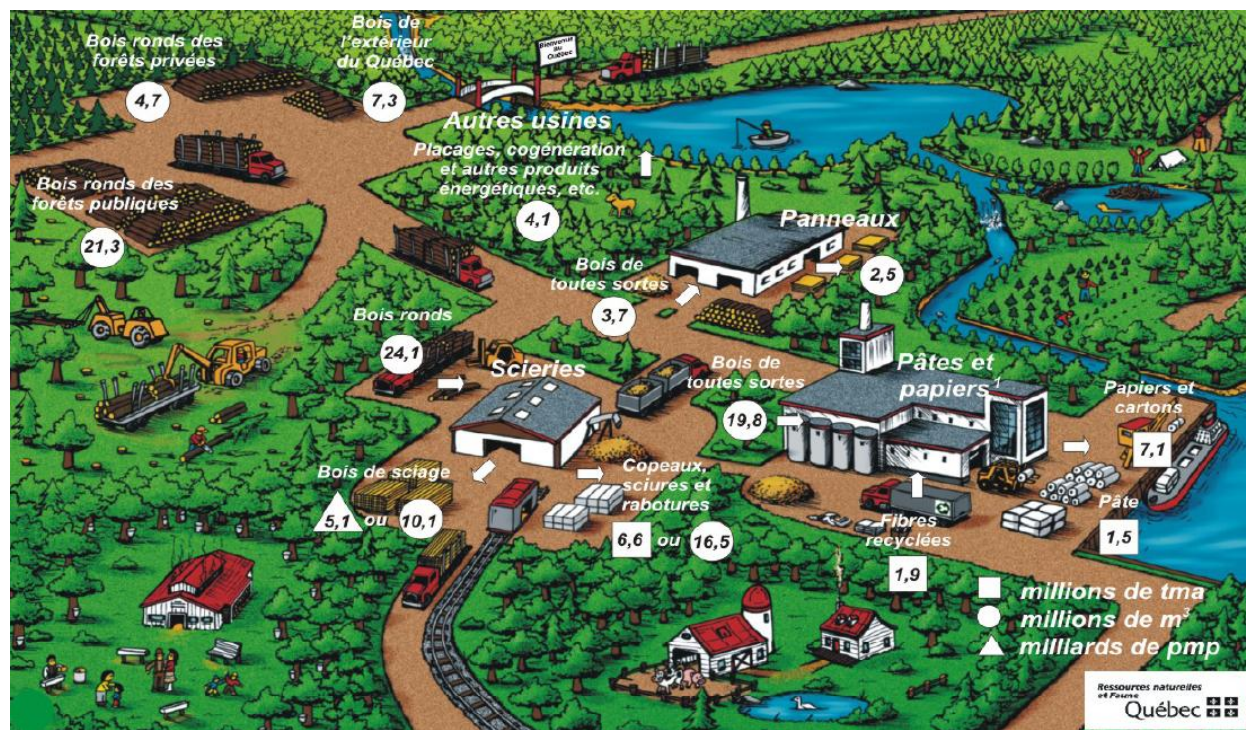


Figure 2.1. Intégration de l'industrie de la transformation du bois (MRNF, 2010).

La fabrication de meubles est une activité qui est plutôt en aval du processus qui part de la forêt jusqu'aux consommateurs. Dans ce processus, les différentes activités peuvent être regroupées par la nature de leurs transformations : activité d'approvisionnement, de première, de deuxième et de troisième transformation. La Figure 2.2 montre les activités nécessaires pour la fabrication de meubles regroupées par étape de transformation :

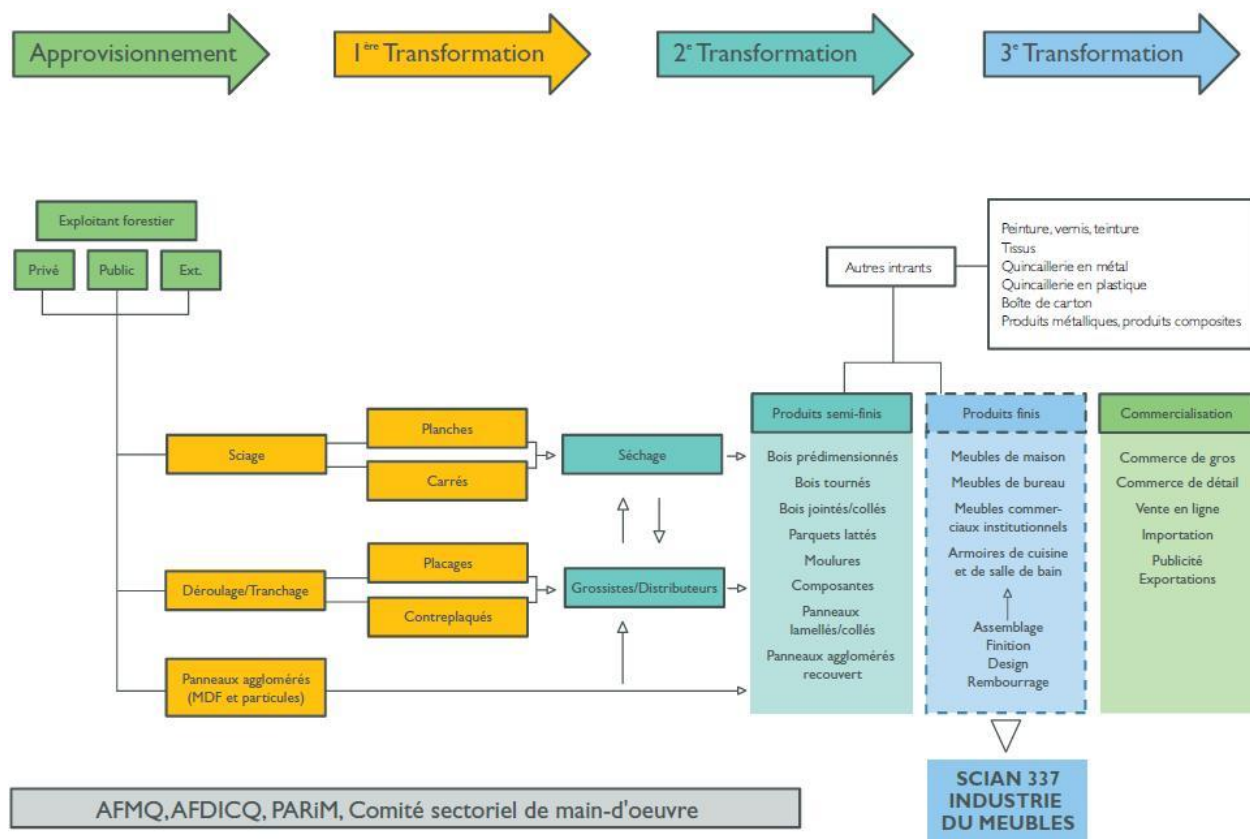


Figure 2.2. Étapes de transformation des meubles en bois (MDEIE, 2007).

Suite à l'approvisionnement, il y a généralement que deux niveaux de transformation du bois où chaque niveau correspond à un type d'usine. Il arrive que la première ou la deuxième transformation soient fractionnées, de sorte qu'un troisième niveau apparaît (Pouliot, 2006).

2.1.2 Approvisionnement

Une grande variété d'essences est utilisée par l'industrie du meuble. Les essences de bois les plus fréquemment utilisées sont, par ordre décroissant, les suivantes :

- Érable à sucre
- Chêne rouge
- Bouleau jaune (merisier)

Comme ces essences ont vu leurs prix augmentés grandement ces dernières années, les fabricants recherchent et utilisent des essences de substitutions dans leurs produits :

- Érable rouge (plaine)
- Chêne blanc
- Cerisier tardif
- Bouleau blanc ou à papier
- Frêne blanc
- Frêne noir
- Hêtre à grandes feuilles.

Les activités d'approvisionnement se font par des exploitants forestiers sur des domaines publics, privés ou étrangers. Les arbres abattus et ébranchés deviennent des grumes qui, une fois tronçonnées en des longueurs standards (voir Figure 2.3), deviennent des billes.



Figure 2.3. Le tronçonnage, une activité liée à l'approvisionnement. Photo : Jacques Laprise

Les grumes, ou les billes selon le cas, sont ensuite transportées à une usine de première transformation.

2.1.3 Première transformation

La première transformation consiste à transformer les billes en sciages. Les installations nécessaires sont communément appelées scierie. Les rebuts sont transformés en composants ou en copeaux (MDEIE, 2007). La Figure 2.4 montre quelques exemples de modes de débitage pour transformer les billes en sciages.

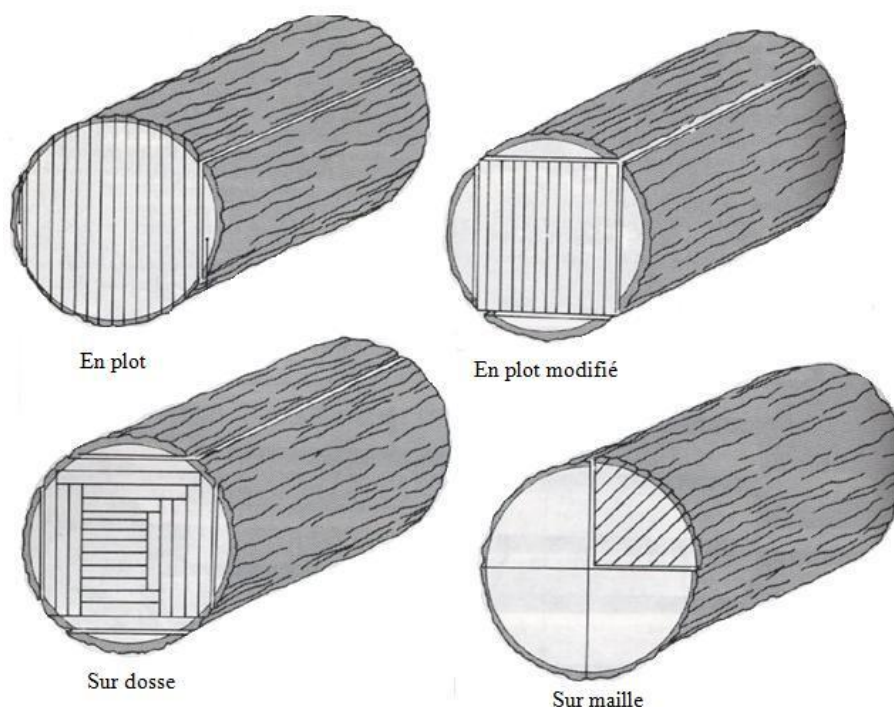


Figure 2.4. Transformation des billes en sciages (Deschênes, 1986).

Les différents sciages tirés des billes n'ont pas la même « qualité », l'agencement des défauts étant différent d'un sciage à l'autre. En effet, le bois est un matériau présentant des diversités à l'intérieur d'une même essence. Par conséquent, un classement des sciages selon leur qualité est nécessaire pour faciliter les transactions commerciales, afin que les parties puissent convenir

d'une échelle de prix faisant intervenir des règles de classement reconnues. En général, les règles sont fonction du nombre, de l'état et de la position des caractéristiques de croissance (ou défauts) qui peuvent diminuer la résistance, la durabilité, l'aptitude à l'usinage ou l'esthétisme. Parmi les caractéristiques identifiables à l'œil nu, il y a les nœuds, les fentes, les poches de résines, les roulures et les décolorations. Un nœud est illustré à la Figure 2.5. Les classes de qualité supérieures ne comportent pas ou presque pas de ces caractéristiques. Mais pour la majorité, il y a un grand nombre de nœuds et de défauts (Deschênes, et al., 2009).



Figure 2.5. Illustration d'un nœud sur un sciage. Photo : Philipp Zinger.

Le classement du bois s'effectue généralement à l'usine de première transformation selon des règles normalisées dont l'établissement est fait par des associations de manufacturiers. Pour classer les essences feuillues utilisées dans l'industrie du meuble, les règles de classement de la *National Hardwood Lumber Association* (NHLA) sont considérées comme la norme par les fabricants canadiens (Deschênes, et al., 2009).

2.1.3.1 Classement NHLA

Les règles de classement NHLA (NHLA, 2007) sont précises et laissent peu de place à l'interprétation (Bouffard, 2005). Le Tableau 2.1, fait état des plus importants critères :

Tableau 2.1. Principaux critères de classement des règles NHLA (Bouffard, 2005).

Classe	Dimensions minimales des sciages	Dimensions minimales des composants	Rendement minimum	Nombre max. de débits
<i>FAS</i>	6" x 8'	4" x 5' 3" x 7'	83-1/3%	4
<i>F1F</i>	6" x 8'	MF: FAS MaF: 1Common	MF: FAS MaF: 1Common	MF: FAS MaF: 1Common
<i>Select</i>	4" x 6'	F: FAS MaF: 1Common	MF: FAS MaF: 1Common	MF: FAS MaF: 1Common
<i>No.1Common</i>	3" x 4'	4" x 2' 3" x 3'	66-2/3%	5
<i>No.2ACommon</i>	3" x 4'	3" x 2'	50%	7
<i>No.3ACommon</i>	3" x 4'	3" x 2'	50%	7
<i>No.2BCommon</i>	3" x 4'	3" x 2'	33-1/3%	Illimité
<i>No.3BCommon</i>	3" x 4'	Largeur > 1½ Aire > 36 po ²	25%	Illimité

Légende : MF = Meilleure face MaF = Mauvaise face

Selon le Tableau 2.1, un sciage de classe *F1F* doit avoir une longueur minimale de 8 pi et une largeur minimale de 6 po. Pour les autres caractéristiques, il faut se référer à celles de la classe *FAS* pour la meilleure face* et *No. 1 Commun* pour la mauvaise. Ainsi :

- Meilleure face : Dimensions minimales des débits de 5 pi et 4 po ou 7 pi et 3 po, un rendement minimal de 83% et un maximum de 4 débits.
- Mauvaise face : Dimensions minimales des débits de 2 pi et 4 po ou 3 pi et 3 po, un rendement minimal de 66 2/3% et un maximum de 5 débits.

À noter que certaines classes sont régulièrement vendues mélangées :

- *Select* avec *No.1 Common*
- *No. 2A Common* avec *No. 2B Common* : on parle alors d'une classe *No. 2 Common*
- *No. 3A Common* avec *No. 3B Common* : on parle alors d'une classe *No. 3 Common*

Pour donner une idée au lecteur des classes typiquement transformées par l'industrie du meuble au Québec, Deschênes et al. (2009) mentionnent les proportions approximatives suivantes : 30 % de *Select* et *FAS*, 40% de *No 1 Common* et 30 % de *No 2 Common*.

En plus de la qualité, la couleur peut aussi apporter une valeur ajoutée à une essence pour la fabrication de certains produits. À ce sujet, la NHLA possède des règles basées sur deux couleurs, montrées à la Figure 2.6 suivante :

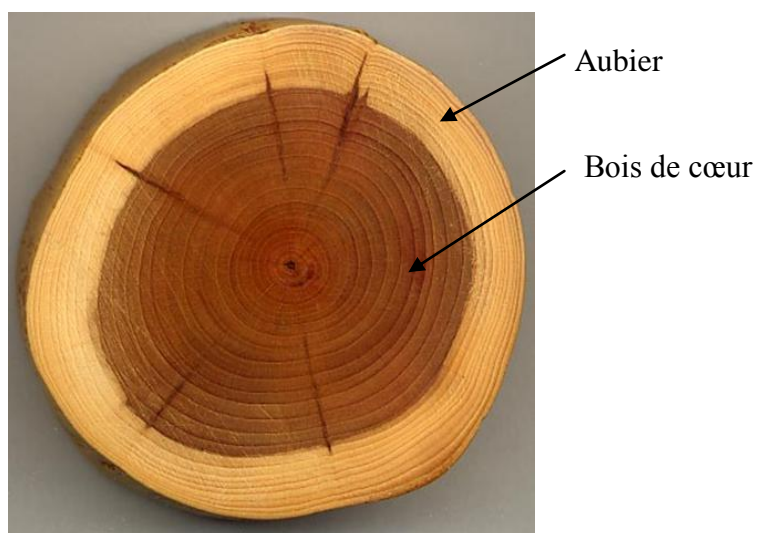


Figure 2.6. Bois d'aubier et bois de cœur. Photo : MPF.

Voici la description de ces couleurs :

- Bois de cœur : Situé dans le centre de l'arbre, généralement plus coloré que l'aubier, bien qu'il n'en soit pas toujours bien différencié. Dans l'arbre vivant, correspond aux couches internes du bois qui ne contiennent plus de cellules vivantes (OQLF).
- Aubier : Situé en périphérie du bois de cœur, de couleur pâle et allant jusqu'à l'écorce. Dans l'arbre vivant, correspond au bois physiologiquement actif et riche en substances nutritives (OQLF).

Le Tableau 2.2 montre les règles de classement NHLA (NHLA, 2007) basées sur ces deux couleurs :

Tableau 2.2. Règles de classement basées sur la couleur.

Classe	Description
<i>Number 1 White</i>	Les deux faces et les deux rives* des débits sont tout en aubier.
<i>Number 2 White</i>	Une face et les deux rives des débits sont tout en aubier et la face opposée de la planche contient au moins 50 % d'aubier.
<i>SAP and Better</i>	Seulement une face du sciage doit être tout d'aubier.
<i>Red One Face and Better</i>	Au minimum une face du sciage est toute de bois de cœur.

Ainsi, en Amérique du Nord les transactions commerciales de bois dur (c.-à-d. la plupart des bois feuillus et certains bois résineux) sont établies en fonction de ces deux classements, selon la qualité et selon la couleur, établis par la NHLA.

2.1.3.2 Séchage

L'étape suivant le classement est généralement le séchage des sciages. Elle consiste à abaisser le taux d'humidité des sciages à un niveau déterminé (MDEIE, 2007). De plus, il est nécessaire de sécher le bois afin de :

- stabiliser les dimensions du bois ;
- prévenir l'activité fongique ;
- éradiquer les champignons et les insectes ;
- réduire la masse du bois ;
- améliorer les propriétés mécaniques ;
- optimiser la tenue des colles.

Bien que le séchage fasse partie des activités de première transformation, il est courant que les usines de deuxième transformation disposent de leurs propres séchoirs, achetant les sciages non séchés. L'entreprise ayant un séchoir peut également offrir cette activité à des clients externes. Les activités de transformation subséquentes appartiennent à la deuxième transformation.

2.1.4 Deuxième transformation

La deuxième transformation est plus sophistiquée et comprend des activités dont l'ordre et la nature dépendent des produits fabriqués. Pour la fabrication de meuble, voici un procédé de transformation typique (Lihra, et al., 2009) présenté dans le Tableau 2.3 :

Tableau 2.3. Procédé de transformation typique dans la fabrication de meubles.

Activité	Description
Rabotage	Pour égaliser l'épaisseur des sciages sur toute leur longueur et pour nettoyer les surfaces afin d'aider à la visualisation des caractéristiques de surface.
Classement maison	Regroupement des sciages selon des règles propres à l'entreprise.
Dimensionnement des composants	Les coupes sont faites en éboutant et en délimitant les sciages.
Collage	Assemblage des composants pour faire des panneaux lamellés-collés.
Usinage	Séries d'opérations sur les composants bruts et les panneaux. Les opérations requises peuvent être : façonnage, perçage et sablage de finition, etc.
Assemblage	Assemblage des composants pour fabriquer les produits commandés.
Finition	Réalisation du fini final avec une application de vernis, de teintes et de peintures sur les produits.
Emballage	Emballage et emboitage des produits commandés.

Le rabotage est la première activité réalisée. Il permet d'égaliser l'épaisseur des sciages sur toute leur longueur et pour nettoyer les surfaces afin d'aider à la visualisation des caractéristiques de surface.

Le classement maison est différent de celui fait selon les normes NHLA. Il existe à des fins d'optimisation, car même si « un classement bien adapté [selon les normes NHLA par exemple] permet [...] de destiner les pièces à des usages où elles se comportent de façon tout à fait satisfaisante » (Deschênes, et al., 2009), les sciages achetés du fournisseur ne sont généralement pas directement utilisables. En effet, même à l'intérieur d'une classe NHLA, chacun des sciages présente des caractéristiques le rendant différent des autres. Il est courant qu'un fabricant classe à

nouveau les sciages selon des règles propres à l'entreprise pour créer des classes qui favorisent un meilleur rendement.

Voici un exemple simple : une entreprise fabrique principalement deux types de tables, un ayant un plateau* d'une longueur 40 po, l'autre de 60 po. Le Tableau 2.4 montre ce à quoi pourraient ressembler les règles maisons :

Tableau 2.4. Exemple de règles maison.

Nom de la classe maison	Règle
<i>Table60</i>	Le sciage contient au moins un composant pouvant entrer dans la fabrication d'un plateau de 60 po.
<i>Table40</i>	Le sciage contient au moins un composant pouvant entrer dans la fabrication d'un plateau de 40 po, mais pas dans un plateau de 60 po.
<i>Autre</i>	Le sciage ne contient pas de composants pouvant entrer dans la fabrication d'un plateau.

La mise en œuvre d'un classement maison peut être de cette façon : après le rabotage d'un sciage (peu importe la classe NHLA), ce dernier passe devant un opérateur-classificateur qui lui attribue une classe maison. Des paquets de sciages de même classe peuvent alors être constitués. S'il y a une production de tables avec un plateau de 40 po, les sciages de classe maison *Table40* peuvent être utilisés en premier. S'il en manque, il est possible d'utiliser la classe *Table60* en sachant que le rendement ne sera pas optimal. Le classement maison est une nécessité technique et économique dont le but est déterminé par les entreprises et vise à avoir un meilleur rendement possible (Deschênes, et al., 2009).

Le dimensionnement des composants comporte deux opérations de base : l'éboutage* et le délignage*. L'éboutage coupe selon la largeur des sciages tandis que le délignage coupe selon la longueur. Il est à préciser que les coupes ne sont pas partielles ; elles parcourent toute la largeur ou la longueur, telles qu'illustrées par la Figure 2.7 :



Figure 2.7. Illustration d'un éboutage et d'un délignage.

Comme plusieurs configurations de coupes peuvent être adoptées pour un même sciage, les résultats diffèrent selon l'opération effectuée en premier et les dimensions des composants ne sont pas les mêmes. Si l'éboutage est fait en premier, on parle alors d'un éboutage en tête, il en résulte des composants de plus courtes longueurs qu'avec un délignage en tête (Wiedenbeck, 2001). Les raisons pour un fabricant de choisir l'éboutage ou le délignage en tête ne sont pas évidentes. Wiedenbeck (2001) a trouvé 12 facteurs pouvant influencer ce choix, tel que la classe et les dimensions des sciages, les types de défauts, le carnet de commandes, etc. Il mentionne notamment que l'éboutage en tête permet d'obtenir un meilleur rendement dans les classes inférieures.

Suite au dimensionnement, il y a le collage longitudinal des composants pour en faire des panneaux lamellés-collés, similaires à celui montré à la Figure 2.8 :



Figure 2.8. Exemple d'un panneau lamellé-collé. Photo : Eve Paquette

Ces panneaux offrent les avantages suivants :

- souplesse d'utilisation ;
- excellent rapport poids/résistance mécanique ;
- grande stabilité dimensionnelle ;
- finition facile (peinture/teinture/vernis) ;
- dimensions et qualités offerts selon les besoins.

Par ailleurs, il existe aussi le bois jointé-collé où le collage s'effectue par les extrémités des composants, souvent retrouvé dans les moulures et les boiseries. Finalement, il existe des panneaux lamellés-collés ayant des lamellés qui sont elles-mêmes jointées-collées.

Les panneaux collés et séchés subissent ensuite différentes opérations d'usinage : découpage, fraisage, rabotage, perçage, etc. Les différents composants usinés sont ensuite assemblés. Une

fois l'assemblage complété, il y a une application de vernis, de teintes et de peintures sur les produits pour la finition.

Ce procédé qui vient d'être passé en revue est pour la fabrication de meubles avec des panneaux lamellés-collés. Le fabricant de meubles qui désire prendre un autre matériau, tel que les panneaux agglomérés, peut débiter directement à l'étape d'usinage (Lihra, et al., 2009).

2.1.4.1 Rendements d'un procédé de transformation

Pour mesurer la performance d'un procédé de transformation, il y a un indicateur bien répandu : le rendement de la matière ou simplement rendement matière. Suivant Gatchell (1985), le rendement matière correspond au ratio entre la quantité du bois sortant et la quantité entrante, exprimé en pourcentage :

$$\text{Rendement matière} = \frac{Qté\ sortant}{Qté\ entrant} = Qté\ entrant - \frac{Rejet}{Qté\ entrant}$$

Cet indicateur peut être calculé pour l'ensemble d'un procédé de transformation ou bien seulement à une activité ou un ensemble. Ainsi, un rendement peut être déterminé pour l'éboutage seul ou pour toutes les opérations de dimensionnement des composants.

D'autres définitions de rendement ont été proposées, comme celle de Yun (1989) qui suggère de considérer le rendement en terme de valeur. Ainsi, elle définit la valeur comme étant le coût de la matière première consommée pour produire un composant. Toutefois, dans cette étude, le rendement utilisé est celui de la matière.

2.2 Le commanditaire : un exemple d'acteur dans l'industrie

Le commanditaire de l'étude a comme activité première la fabrication de meubles. Ainsi, une description de son profil donne au lecteur un aperçu de ce à quoi peut ressembler une entreprise œuvrant dans l'industrie du meuble au Québec. Dans cette optique, la première section présente le commanditaire de l'étude. La deuxième section présente une division du commanditaire ayant des activités particulières en fabricant des panneaux lamellés-collés. La dernière section présente le procédé de transformation de cette division, procédé qui est l'objet de cette étude.

2.2.1 Le commanditaire

L'entreprise est vouée à la conception, à l'assemblage, à la finition et à la commercialisation de meubles de salle à manger et cuisine. Elle s'est taillé une place importante sur le marché états-unien et exporte maintenant vers des pays sur trois continents. Elle comptait en 2009 environ 700 employés et un chiffre d'affaires avoisinant les 75 M\$.

L'entreprise offre plusieurs collections de meubles. Elle permet au consommateur de personnaliser son mobilier en choisissant lui-même ses combinaisons de couleurs, d'essences et de finis de bois.

Pour la fabrication de ses produits, le commanditaire dispose d'un réseau de fournisseurs comprenant une division, lui appartenant, qui l'approvisionne en panneaux lamellés-collés.

2.2.2 Division de panneaux lamellés-collés

La division fabrique principalement des panneaux lamellés-collés et d'autres composants en bois solide. Elle possède des installations de séchage d'une capacité annuelle de 8,5 millions de PMP. Établie depuis 1967, le commanditaire en a fait l'acquisition en 1993 pour s'assurer d'un approvisionnement stable en panneaux. L'entreprise compte aujourd'hui environ 90 employés pour un chiffre d'affaires de 10 à 25 M\$.

La présente étude porte sur le procédé de transformation de cette division qui est présenté en détail dans la prochaine section.

Dans le reste du mémoire, le commanditaire et sa division seront appelés invariablement commanditaire.

2.2.3 Procédé de fabrication du commanditaire

Le procédé est similaire à celui du Tableau 2.3 auquel il faut ajouter une étape réalisée au début soit un séchage des sciages. L'essence utilisée est principalement le merisier, mais la plaine est aussi transformée.

Le commanditaire a son classement maison. À la sortie du rabotage, les sciages rabotés défilent devant un opérateur-classificateur qui les évalue une à une pour leur attribuer une classe maison. Il y a essentiellement deux critères à la base des règles maison : la longueur et la qualité des composants attendus d'un sciage.

Le Tableau 2.5 présente un résumé des classes et de leurs caractéristiques pour le merisier d'épaisseur 4/42. Les classes sont présentées dans un ordre décroissant de qualité.

² Les épaisseurs des sciages sont exprimées en ¼ de pouces : 4/4 signifie 1 pouce.

Tableau 2.5. Classement maison utilisé par le commanditaire, version de mars 2010.

Classe	Description
2	Le composant principal* est exempt de défauts sur ses deux faces et sa longueur fait au moins 75 % de celle du sciage.
<i>RIEN</i> ³	Le composant principal doit contenir deux longueurs de plateau de table. Au moins une face doit être exempte de défauts et faite d'aubier.
<i>l</i>	Version raccourcie de la classe <i>Rien</i> . Le composant principal doit contenir une longueur de plateau de table. Aussi, au moins une face doit être exempte de défauts et faite d'aubier.
<i>O</i>	Correspond à un sciage ayant peu de défauts, mais ceux-ci empêchant sa qualification pour la classe <i>l</i> . Deux coupes et plus sont effectuées sur ces sciages.
<i>S</i>	Ressemble à la classe <i>O</i> , mais le sciage contient davantage de défauts, mais pas assez pour appartenir à la classe <i>X</i> . Des composants de moins de 39 po en sont tirés.
<i>X</i>	Cette classe est atypique, car c'est la présence de défauts qui est recherchée. Il y a des restrictions quant à l'ampleur des défauts et ceux-ci doivent être distribués uniformément sur le sciage. Le composant principal doit couvrir la pleine longueur de la planche. Ce bois est utilisé dans la fabrication de produits d'allure ancienne.

Après leur évaluation, les sciages sont empilés pour constituer des paquets de même classe.

Pour le dimensionnement des composants, le procédé du commanditaire un éboutage en tête, suivi d'un délignage. Si nécessaire, un nouveau cycle d'éboutage et de délignage peut être réalisé pour une utilisation maximale des sciages.

³ L'opérateur-classificateur inscrit à la craie sur le sciage le nom de la classe qu'il lui attribue. Mais il y a une exception : pour la classe « *RIEN* », il n'inscrit rien sur les sciages, d'où le nom de la classe.

2.3 Unités de mesure propre à l'industrie du bois

Voici une présentation des deux unités de mesure propres à l'industrie du bois et utilisées dans ce mémoire, le PMS et le PMP.

Pied mesure de surface (PMS)

Mesure la surface des sciages en pied carré. Déterminée par la longueur de la planche en pied multipliée par la largeur en pouce, divisé par 12 :

$$Longueur (pi) \times \frac{Largeur (po)}{12} = PMS$$

Pied mesure de planche (PMP)

Cette unité mesure le volume des sciages. L'unité de base correspond à un PMS de un pouce d'épaisseur, c'est-à-dire une tranche de 1 pi x 1 pi x 1 po, telle que montrée par la formule suivante :

$$Longueur (pi) \times \frac{Largeur (po)}{12} \times \text{Épaisseur (po)} = PMS \times \text{Épaisseur (po)} = PMP$$

(American Hardwood Export Council, 2008)

Avec ces notions de base présentées au lecteur, la revue de la littérature peut être abordée.

CHAPITRE 3 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les notions de base ont permis au lecteur de se familiariser avec le sujet de l'étude. Maintenant, voici la revue de la littérature qui permet au lecteur de situer l'étude par rapport aux autres recherches effectuées sur le même sujet et ainsi de lui donner un cadre théorique.

Il y a trois thèmes de la littérature qui suscitent de l'intérêt dans cette étude : les logiciels de simulation de procédés de deuxième transformation du bois, les modèles d'optimisation de combinaisons de sciages et les technologies de détection des défauts automatique. Chacun de ces thèmes fait l'objet d'une section.

3.1 Logiciels de simulation de procédés de transformation

De petits changements dans un procédé de deuxième transformation provoquent souvent des conséquences inattendues et indésirables. Les interactions entre les classes de sciages, les paramètres des équipements, les requis du carnet de commandes et d'autres facteurs rendent incertaine la prédiction des effets d'un seul changement. Un logiciel de simulation, tel que *ROMI-3* de la Figure 3.1, permet aux fabricants et aux chercheurs de pouvoir tester des hypothèses sans subir l'influence de facteurs « parasites ». Ils peuvent utiliser la simulation à loisir, pratiquement sans frais, sans occasionner de problèmes dans une usine existante. (Buehlmann, 1998; Thomas & Weiss, 2006). Toutefois, la capacité d'un logiciel de reproduire fidèlement les procédés réels doit être validée.

Buehlmann (1998) fait l'historique des algorithmes, programme et logiciels agissant comme simulateur de procédés de deuxième transformation depuis l'avènement de l'informatique. Ces simulateurs se font de plus en plus aptes à reproduire une vraie usine de deuxième transformation du bois. Dans les années 2000, deux logiciels d'optimisation ont vu le jour, *ROMI-3* (Weiss & Thomas, 2005) ainsi que *Optimiseur deux axes* (O2A) (Caron, 2001). Ceux-ci déterminent entre

autres le rendement matière pour un carnet de commandes, un procédé de transformation et des sciages de classes donnés.

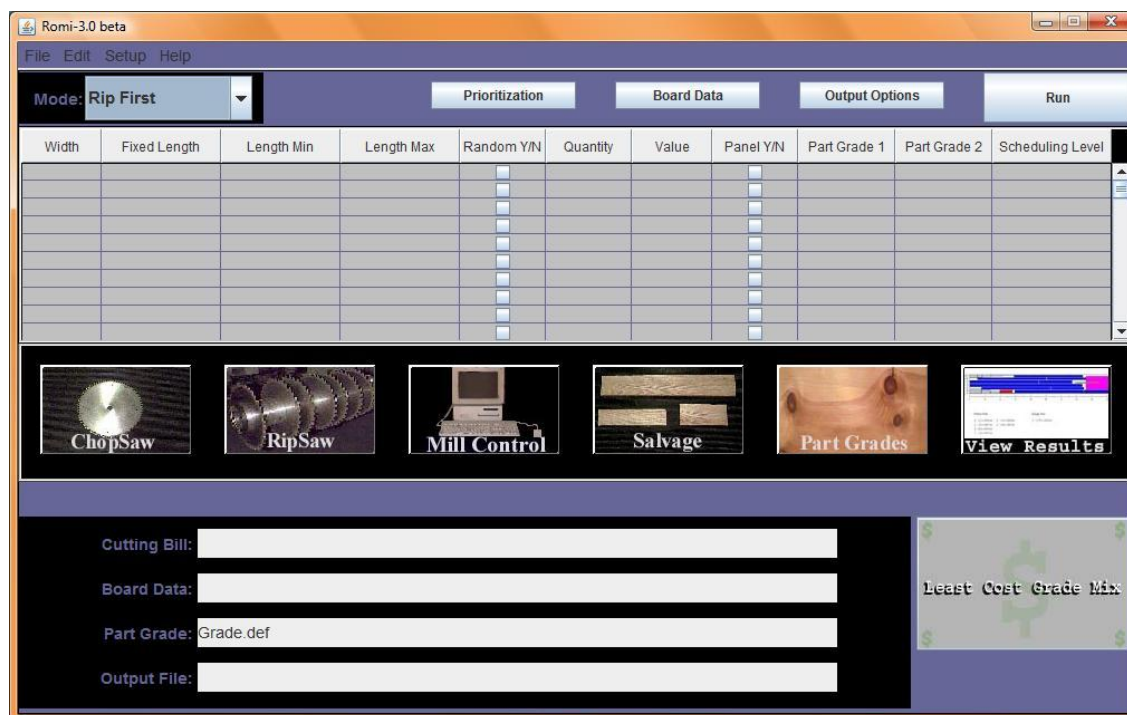


Figure 3.1. Fenêtre principale du logiciel *ROMI-3*.

ROMI-3, présenté à la Figure 3.1, est le dernier-né d'une série de logiciels développés par le *United States Department of Agriculture Forest Service (USDA Forest Service)*. Il a été développé à partir des dernières versions précédentes, *ROMI-RIP* et *ROMI-CROSS*, qui avaient déjà été validées (Thomas & Buehlmann, 2002). Avec *ROMI-3*, l'utilisateur précise les paramètres du procédé à simuler, le carnet de commandes, la stratégie de priorisation et les combinaisons de classes de sciages. Après simulation du procédé, il donne le rendement matière, les dimensions des composants générés et pour chaque sciage virtuel, il peut générer une figure montrant le sciage avec ses transformations, ses défauts et ses composants générés. Il utilise une banque de sciages contenant 3000 sciages séchés de chêne rouge d'Amérique numérisés par Gatchell et al. (1998). Pour le procédé de transformation, l'utilisateur peut spécifier un système éboutage en tête ou délignage en tête. La production de panneaux lamellés-collés peut également être simulée. Une caractéristique importante du logiciel est la présence d'un module

d'optimisation de combinaisons de sciages qui détermine une combinaison optimale pour exécuter un carnet de commandes donnée (Weiss & Thomas, 2005). *ROMI-3* et le document *User Guide* (Weiss & Thomas, 2005) peuvent être téléchargés gratuitement à partir du site de la *USDA Forest Service* (www.fs.fed.us/ne/princeton/software).

Un autre logiciel de simulation est O2A, développé à partir de 2001 par le Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ). Ce logiciel est inclus dans plusieurs projets d'équipements du CRIQ dont le *BorealScanMD*. Ce dernier est un système de débitage deux axes complètement automatisé qui intègre les dernières technologies de vision couleur, de profilométrie et d'optimisation pour apporter à l'industrie québécoise du meuble une réponse à la concurrence asiatique (Dupont, 2006). Le logiciel a deux usages : être intégré à un équipement spécialisé en mode production ou être utilisé en recherche en mode autonome. Tout comme le *ROMI-3*, il peut simuler soit un procédé avec le délignage en tête ou avec l'éboutage en tête. Mais en plus, il permet de simuler un procédé dit « sélectif ». Un procédé est dit sélectif quand le logiciel, après avoir examiné un sciage, sélectionne soit un délignage en tête, soit un éboutage en tête pour le transformer (Caron, 2003). D'un point de vue industriel, un procédé sélectif implique que le procédé permet de transformer tout sciage soit avec l'éboutage en tête, soit avec le délignage en tête. L'O2A fournit des résultats diversifiés, dont le rendement matière, la valeur monétaire, le plan de débitage, la distribution des produits et le plan de débitage généré (Caron, 2001). La base de données contient plus de 2700 planches numérisées d'érable à sucre et de cerisier noir de toutes les classes NHLA. Cette base de données a été créée et est maintenue par le CRIQ (Caron, 2003).

3.2 Les modèles d'optimisation de combinaisons de sciages

Les sciages constituent une part significative du coût de production dans une usine de deuxième transformation du bois (X. Zuo, Buehlmann, & Thomas, 2003). Leur qualité influence grandement la performance d'un procédé de deux façons. D'un côté, les sciages de qualité inférieure sont moins dispendieux, mais plus chers à transformer. De l'autre, les sciages de qualité supérieure coûtent cher, mais leur transformation occasionne moins de coûts (X. Zuo, et

al., 2003). Ainsi est le problème de trouver la combinaison optimale de sciages qui minimise conjointement le coût en sciages et le coût de transformation (X. Zuo, et al., 2003). Ce type de problème est communément appelé dans la littérature de langue anglaise *Least-Cost Lumber Grade-Mix Problem* ou, en traduction libre, problème d'optimisation de combinaisons de classes de sciages.

Les premières solutions à ce type de problèmes ont été obtenues à l'aide de chartes prédisant le rendement. Il y avait une charte pour chaque classe et l'utilisateur pouvait faire des combinaisons pour tenter d'obtenir la solution optimale (Englerth & Schumann, 1969).

Ensuite sont venus les premiers programmes informatiques. Pour résoudre ce type de problèmes, les premiers programmes ont considéré une relation linéaire entre le rendement matière et les combinaisons de classes (Weiss & Thomas, 2005). Par exemple, supposons les classes X et Y avec un rendement matière respectif de 60% et 70%. Considérons une relation linéaire. Une combinaison 50-50 offrirait alors un rendement de 65% ($0,5 \times 60\% + 0,5 \times 70\% = 65\%$).

En considérant une telle relation, des modèles d'optimisation linéaires ont été utilisés pour déterminer les solutions de combinaisons (Buck, 2009). L'industrie forestière a largement utilisé ces modèles par l'entremise de logiciels tels que *OPTIGRAMI 2.0* (Lawson, Thomas, & Walker, 1996) et *RIP-X* (Harding & Steele, 1997). Pour ce dernier, voici le modèle de programmation linéaire pour obtenir un coût de réalisation minimal :

Fonction-objectif

$$\text{Minimiser } Z = \sum_{i=1}^6 C_i X_i + 0 \sum_{i=6}^6 \sum_{j=1}^n V_{ij}$$

Sous les contraintes suivantes :

Contrainte de volume par classe

$$X_i \leq M_i \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, 6$$

Contrainte de volume des composants

$$\sum_{i=1}^6 V_{ij} = P_j \quad \text{pour } j = 1, 2, \dots, n \text{ et } i = 1, 2, \dots, 6$$

Distribution du volume des composants par classe

$$Y_{ik} X_i - \sum_{j=1}^i V_{i((k+1)-j)} \geq 0 \quad \text{pour } j = 1, 2, \dots, n \text{ et } i = 1, 2, \dots, 6$$

Non-négativité

$$X_i, V_{ij}, P_j, Y_{ik}, C_i \geq 0 ; n > 0$$

Où :

Z = coût de réalisation du carnet de commandes (\$)

i = indice pour la classe de planches considérée

j = indice pour le volume des composants requis

k = indice pour le rendement des classes

n = nombre de composants dans le carnet de commandes

M_i = volume maximal disponible d'une classe i (PMP)

X_i = volume d'une classe i requis pour réaliser le carnet de commandes (PMP)

V_{ij} = volume d'un composant j devant être découpé dans une classe i (PMP)

P_j = volume total d'un composant j à être découpé (PMP)

Y_{ik} = rendement d'une classe i quand la somme $\sum V_{ij}$ est découpée à partir d'une classe (%)

C_i = coût de transformation de 1000 PMP d'une classe i (\$/1000)

À noter que la variable V_{ij} possède un coefficient de valeur nulle parce que le coût associé à la production de chaque pièce est inclus dans le coût de transformation de chaque classe de sciages.

Ce modèle a été validé avec le procédé de transformation de deux usines. Les résultats ont montré que les simulations réalisées par *RIP-X*, utilisant ce modèle, reproduisent adéquatement les procédés réels (Harding & Steele, 1997).

Toutefois, la relation linéaire entre le rendement matière et les combinaisons de classes n'avait jamais été validée jusqu'à ce que Zuo et al. (2004) en fassent un sujet d'étude. L'étude montre que l'hypothèse d'une relation linéaire ne s'applique pas pour la majorité des carnets de commandes à réaliser. C'est seulement dans certains cas que la linéarité a été observée, le plus souvent pour des combinaisons de deux classes seulement qui, de plus, étaient similaires (*1Common + 2ACCommon* par exemple). De façon générale, plus les classes d'une combinaison sont différentes, plus la linéarité est compromise. La longueur des composants du carnet de commandes est aussi un autre facteur qui influence la linéarité de la relation disent les auteurs. Au final, la relation entre le rendement matière et les combinaisons de classes est hautement complexe (X. Zuo, et al., 2004).

Par rapport à ces résultats, Zuo (2003) et Buehlmann et al. (2004) ont développé un modèle statistique pour obtenir des solutions aux problèmes de combinaisons sans utiliser une relation linéaire. Premièrement, *ROMI-3* est utilisé pour générer le rendement matière pour 25 combinaisons de classes prédéterminées. Deuxièmement, ces résultats sont transformés pour obtenir les coûts de production respectifs. Troisièmement, ses résultats sont utilisés pour créer une surface représentant le coût de production selon la combinaison. Ainsi, cette surface peut prédire le coût de production pour les différentes combinaisons possibles de classes. De cette même manière, le rendement matière et le coût d'approvisionnement peuvent être calculés (Buck, 2009). Une validation a été faite et pour neuf carnets de commandes testés sur dix, ce modèle statistique a trouvé des solutions moins chères que celles fournies par *OPTIGRAMI 2.0* (Buehlmann, Zuo, & Thomas, 2008). Ce modèle statistique a été mis en œuvre dans *ROMI-3* sous forme de module.

Ce dernier cas montre qu'avec un logiciel de simulation et un modèle d'optimisation de combinaisons, il est possible pour un fabricant de les utiliser conjointement pour optimiser les performances de son usine (Buck, 2009). Une fois le logiciel paramétré pour simuler adéquatement le procédé existant, différentes combinaisons peuvent être générées par un modèle d'optimisation de combinaisons pour ensuite être validées dans l'usine virtuelle. Une fois la solution optimale identifiée, le fabricant peut la mettre en œuvre dans son usine.

3.3 Technologies de détection de défauts dans le bois

Le dernier thème de la revue est les technologies de détection des défauts. Dans un article de la revue mensuelle *Modern Woodworking* (Crissey, 2003), Buehlmann avance que la technologie, combinée avec de nouveaux plans d'affaires et l'innovation, est la seule chose qui peut sauver l'industrie états-unienne de meubles. De plus, il ajoute en disant que même si les salaires de la main d'œuvre chinoise triplaient, ceux-ci demeureraient encore au tiers, et même moins, de ce que les fabricants états-uniens (et leurs semblables canadiens) paient. Parmi les avenues de solutions possibles, Rancourt (2004) parle de l'amélioration du rendement de la matière première et de l'amélioration des coûts d'approvisionnement à l'aide de technologies de détection de défauts. Cette avenue d'automatisation doit être considérée par les fabricants de panneaux lamellés-collés pour faire face aux perturbations qui menacent leurs marchés. Elles sont vouées à améliorer le rendement matière et à diminuer les coûts d'approvisionnement (Rancourt, 2004).

Dans l'étude de Rancourt (2004) sont évalués les systèmes de vision automatique offerts à l'industrie pour détecter les défauts du bois franc. Elle a contacté 19 fabricants offrant ce type de technologie ; 4 ont accepté de les faire évaluer. « Les résultats démontrent que les systèmes évalués ne sont [pas], à ce jour, capables de détecter l'ensemble des défauts pour la production de composants de bois franc. » Toutefois, « les préparatifs de l'étude ne reflètent pas la démarche qui devrait être faite préalablement à l'évaluation d'un système de vision en vue de l'installer en usine pour une utilisation particulière. Des détails spécifiques sur la détection de certaines caractéristiques et la définition de familles de produits permettraient l'ajustement des paramètres des équipements et permettraient ainsi l'obtention de résultats nettement plus encourageants »

(Rancourt, 2004). Par contre, l'ajustement de ces paramètres nécessite des expertises que le fabricant ne possède pas nécessairement à l'interne.

Par ailleurs, pour aider ces fabricants à faire l'acquisition d'un système répondant adéquatement à ses besoins, elle propose une démarche. De cette démarche, il est à souligner que la première étape pose la question suivante : l'automatisation [à l'aide d'un système de vision] est-elle vraiment l'avenue à prendre pour le fabricant ? En effet, compte tenu du coût et de la complexité de l'intégration de cette technologie, il est souhaitable aux fabricants d'envisager d'autres pistes de solutions (Rancourt, 2004).

3.4 Synthèse

Une innovation technologique pour choisir un approvisionnement optimal serait de faire appel à un logiciel de simulation de procédé jumelé à un solveur pour déterminer l'approvisionnement optimale. La mise en œuvre de cette innovation est déjà permise par les logiciels existants. Ainsi, utiliser le logiciel *ROMI-3* avec son module d'optimisation des combinaisons permet une telle approche. Toutefois, le logiciel *ROMI-3*, tout comme *O2A*, ne permet pas de simuler le procédé de fabrication de panneaux lamellés-collés du commanditaire, essentiellement parce que son procédé comporte trop d'opérations manuelles dont le logiciel ne peut tenir compte. Par exemple, les procédés simulés par ces logiciels doivent comporter une scie multiple à refendre* (*Gang ripsaw*), ce qui n'est pas le cas chez le commanditaire, où le délignage s'effectue manuellement avec une scie simple. Et pour le moment, l'achat de nouveaux équipements pour adapter le procédé afin qu'il puisse être simulé par un de ces logiciels n'était pas envisagé par le commanditaire.

Une autre innovation technologique serait d'intégrer un équipement de détection de défauts automatique. Rancourt (2004) a produit une étude dans laquelle elle a évalué les systèmes de vision automatique détectant les défauts du bois franc. Toutefois, ces systèmes sont dispendieux, complexes à implanter et ne sont pas capables de détecter l'ensemble des défauts pour la production de composants de bois franc. Avant d'opter pour l'acquisition d'un tel équipement,

elle recommande aux industriels de s'assurer qu'il n'y a pas d'autres avenues possibles. Et encore une fois, le commanditaire n'envisageait pas d'investir dans de tels équipements.

CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

Pour atteindre l'objectif, un nouvel outil d'optimisation de l'approvisionnement doit être créé, car les connaissances actuelles vues dans la revue de la littérature ne le permettent pas. Ce chapitre présente la méthodologie pour y parvenir. D'abord, la structure envisagée de l'outil est illustrée et expliquée. Ensuite, les différentes étapes à réaliser pour mettre en œuvre l'outil sont énumérées.

La structure envisagée de l'outil est similaire à celle de ROMI-3 en incluant le module d'optimisation. Elle est illustrée à la Figure 4.1 :

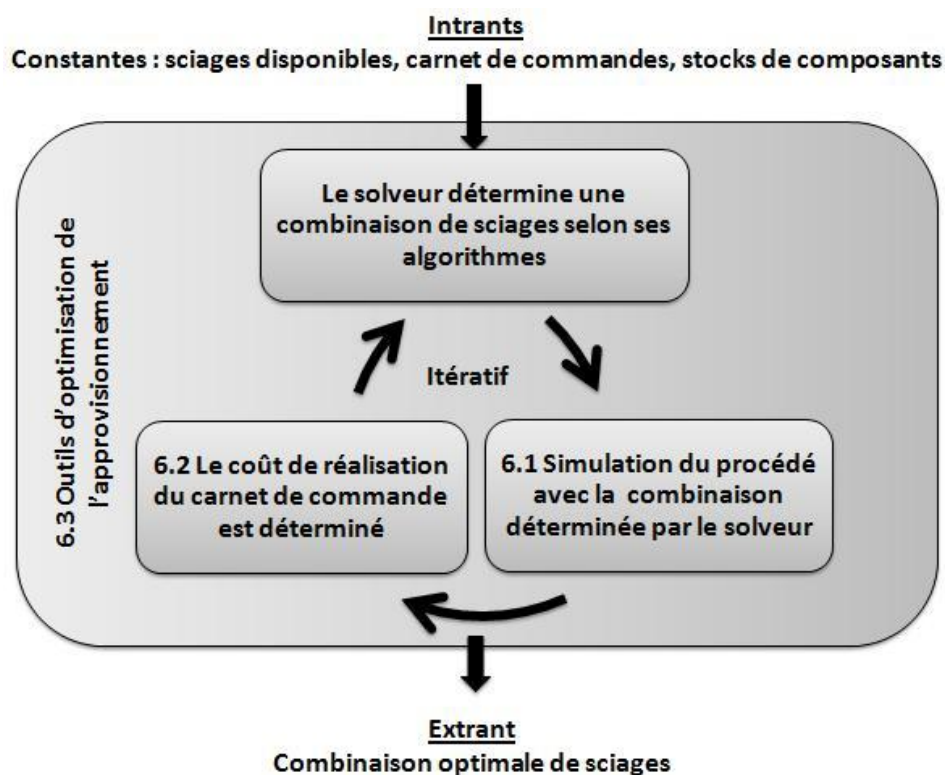


Figure 4.1. Structure de l'outil d'optimisation.

D'abord, les constantes, tels que les sciages disponibles, le carnet de commandes et les stocks de composants, sont spécifiées dans l'outil. Ensuite vient une série de trois étapes faites de façon

itérative. Premièrement, le solveur détermine une combinaison de sciages. Deuxièmement, la transformation des sciages de cette combinaison est simulée par l'outil de simulation qui détermine les composants résultants. Troisièmement, la valeur de la fonction-objectif d'un modèle d'optimisation est déterminée à partir des résultats de la simulation. Ensuite, retour à la première étape où le solveur prend connaissance du dernier résultat et, en utilisant ses algorithmes, détermine à nouveau une nouvelle combinaison pour la prochaine itération. Suite à la phase itérative, le solveur identifie la combinaison de sciages optimale selon la fonction-objectif.

Cette structure peut être divisée en quatre parties : le solveur, l'outil de simulation, le modèle mathématique et l'outil d'optimisation qui utilise les trois premières. Le solveur qui sera utilisé est celui intégré à *Excel* qui peut traiter des problèmes d'optimisation linéaire ou légèrement non linéaire (*smooth nonlinear*). Il présente l'avantage d'être convivial et gratuit tout en donnant des solutions satisfaisantes pour les problèmes d'optimisation simples. Pour l'outil de simulation, comme les logiciels existants ne peuvent pas être utilisés, il devra être créé. Quant au modèle mathématique, il sera lui aussi créé en tenant compte de la réalité du commanditaire. Finalement, un outil d'optimisation de l'approvisionnement sera développé et mettra en œuvre le solveur, l'outil de simulation et le modèle.

Ainsi, pour parvenir à créer l'outil d'optimisation, voici les différentes étapes à réaliser :

- Développer un outil de simulation de procédés de fabrication de panneaux lamellés-collés ;
- Développer un modèle d'optimisation de l'approvisionnement ;
- Développer un outil d'optimisation de l'approvisionnement utilisant l'outil de simulation et le modèle d'optimisation ;
- Valider l'outil avec un cas d'étude.

Les contributions sont présentées dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 5 CONTRIBUTIONS

Ce chapitre présente les contributions de l'étude. Il comporte trois sections. La première section rend compte de l'outil développé qui permet de simuler le procédé de transformation du commanditaire. La deuxième section présente le modèle d'optimisation développé pour minimiser les coûts de réalisation d'un carnet de commandes. La dernière section présente l'outil d'optimisation de l'approvisionnement.

5.1 Outil de simulation de procédés de fabrication de panneaux lamellés-collés

Comme mentionné dans la section 3.4, les logiciels existants, tels que *ROMI-3* et *O2A*, ne permettant pas de simuler le procédé de transformation du commanditaire, une autre approche a été utilisée pour simuler le procédé. Il s'agit de constituer des « profils de composants » qui indiquent les quantités de composants générées par 1000 PMP de sciages suite aux opérations de transformation. La Figure 5.1 montre un exemple de profil de composants :

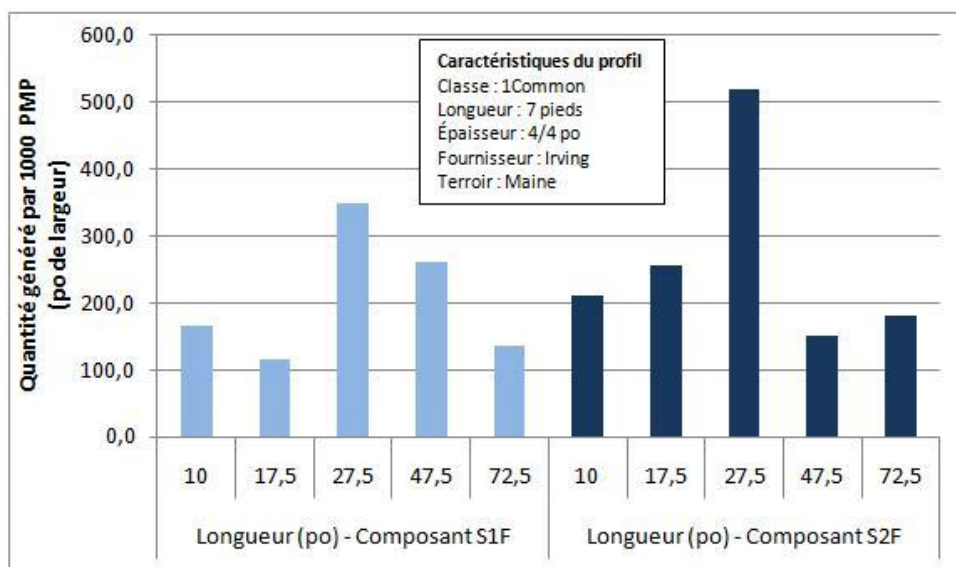


Figure 5.1. Exemple d'un profil de composants.

Les profils de composants peuvent être basés sur plusieurs caractéristiques selon les besoins du fabricant et les données dont il dispose. Ainsi, une série de profils pourrait être générée en tenant compte d'une ou de plusieurs de ces caractéristiques : fournisseur, terroir, essence, couleur, classe, longueur et épaisseur. Le profil de composants de l'exemple de la Figure 5.1 indique les quantités qui devraient être générées par la transformation de 1000 PMP de sciages avec les caractéristiques suivantes :

- Classe NHLA *1Common* ;
- Longueur nominale de 7 pieds ;
- Épaisseur nominale de 1 pouce (ou 4/4 de pouce) ;
- Fournisseur : Irving ;
- Terroir : l'État du Maine.

Les différentes colonnes représentent les quantités pour chaque type de composant qui se distingue par leur qualité et leur longueur. Dans cette étude, deux qualités de bois sont considérées : bois sain sur une face (*S1F* pour *Sound 1 Face*) et bois sain sur les deux faces (*S2F* pour *Sound 2 Faces*) (Weiss & Thomas, 2005). Le bois sain peut contenir des défauts visuels à condition que ceux-ci ne compromettent pas les propriétés mécaniques. Par exemple, un nœud sain ne doit pas contenir de pourriture. Le bois sain est à distinguer du bois net de défauts visibles. Quant aux longueurs, l'exemple possède cinq longueurs différentes pour chacune des qualités.

Les quantités de composants sont exprimées en pouce de largeur. Cette unité de mesure s'applique bien à la fabrication de panneaux lamellés-collés, où la largeur requise d'un panneau d'une longueur donnée est obtenue grâce au collage de plusieurs composants de même longueur (Figure 2.8).

Par exemple, on peut voir dans la Figure 5.1 entre autres que pour 1000 PMP de sciages spécifiés, environ 350 pouces de largeur de composants d'une longueur de 27½ pouces et de qualité *SIF* sont attendus.

Avec de tels profils, il est alors possible de simuler sans avoir à configurer une usine virtuelle. Il s'agit pour une combinaison donnée de classes de sciages de faire la combinaison correspondante de profils en respectant les proportions et d'obtenir ainsi la quantité attendue de chacun des composants. Voici un exemple :

Combinaison initiale

- 5000 PMP de *1Common*
- 500 PMP de *FAS*
- 1200 PMP de *2ACommon*

Résultat

$$\begin{aligned}
 & (5000 \text{ PMP}/1000) \times \text{quantités du profil } 1\text{Common} \\
 & \quad + \\
 & (500 \text{ PMP}/1000) \times \text{quantités du profil } FAS \\
 & \quad + \\
 & (1200 \text{ PMP}/1000) \times \text{quantités du profil } 2A\text{Common}
 \end{aligned}$$

Pour obtenir les profils nécessaires au développement d'un outil d'optimisation, un échantillon de sciages a été utilisé. Les sciages ont été examinés ainsi que les composants qu'ils ont générés. La section qui suit donne les détails de cette acquisition de données.

5.1.1 Description de l'échantillon de sciages

L'échantillon utilisé pour cette étude consiste en 191 sciages de merisier. Ils proviennent de l'entrepôt du commanditaire. Le Tableau 5.1 montre leurs caractéristiques :

Tableau 5.1. Caractéristiques des sciages de l'échantillon de l'étude.

Caractéristique	Valeur
Fournisseur	<i>Irving</i>
Terroir	Maine
Essence	Merisier
Couleur	<i>1 & 2W</i>
Classe NHLA	Mélange de 2 <i>Commun</i> (106 planches) et 3A (85)
Longueur nominale	7 pieds
Épaisseur nominale	4/4 pouce

Cet échantillon de sciages a ensuite été « transformé » à l'usine de panneaux lamellés-collés du commanditaire.

5.1.2 Transformation des sciages de l'échantillon

Les sciages ont d'abord été numérotés. Ensuite, ils ont été introduits dans le procédé de transformation du commanditaire pour y subir trois opérations :

Rabotage : Opération qui donne une épaisseur uniforme aux sciages tout en enlevant des irrégularités de surface. Les mêmes équipements et procédures habituelles ont été utilisés.

Classement maison : Les sciages ont été évalués selon les classes maison en vigueur à ce moment-là, présenté dans le Tableau 2.5.

Coupe des sciages : Ensuite, deux employés familiarisés avec les procédés d'éboutage et de délignage ont tracé les composants à la craie sur les sciages. Ce faisant, la transformation était simulée.

Les données sur les dimensions et la qualité des composants résultants ont été acquises. Le Tableau 5.2 montre un exemple de données acquises sur un sciage :

Tableau 5.2. Exemple de données acquises sur un sciage.

Caractéristique	Valeur	Caractéristique (suite)	Valeur (suite)
Numéro d'identité du sciage	72	Largeur réelle (po)	5,625
Terroir ⁺	Maine	Longueur réelle (po)	85,0
Fournisseur ⁺	<i>Irving</i>	Qualité du composant #1	<i>S1F</i>
Couleur nominale ⁺	<i>1 & 2W</i>	Longueur du composant #1 (po)	51,0
Longueur nominale (po) ⁺	7,0	Largeur du composant #1 (po)	5,5
Épaisseur nominale (po)	4/4	Qualité du composant #2	<i>S2F</i>
Classe NHLA nominale ⁺	<i>2Com</i>	Longueur du composant #2 (po)	21,0
Classe maison ⁺	1	Largeur du composant #2 (po)	5,0

⁺Caractéristiques pouvant définir les profils.

La longueur réelle et la largeur réelle servent à déterminer les quantités de bois en PMP. La qualité, la longueur et la largeur des composants servent à déterminer les quantités générées, en pouces de largeur, dans les profils de composants. À noter que le nombre maximal de composants d'un seul sciage a été de 5 dans l'échantillon.

Pour l'outil de cette étude, la caractéristique retenue pour définir les profils est la classe, maison ou NHLA. La raison pour retenir cette seule caractéristique est que les données ne sont pas disponibles pour des profils plus raffinés. Les sciages de l'échantillon n'ont qu'une seule longueur, qu'une seule couleur, qu'un seul fournisseur et qu'un seul terroir.

Avec les données recueillies, sept profils ont pu être créés, tels que montrés par le Tableau 5.3 :

:

Tableau 5.3. Profils de composants créés à partir de l'échantillon.

Classe	Rendement		Longueur (po) - Composant S1F						Longueur (po) - Composant S2F				
			10	17,5	27,5	47,5	72,5		10	17,5	27,5	47,5	72,5
<u>NHLA</u>													
2Common	0,544	Quantité (po largeur)	165,4	110,0	604,1	241,5	67,9	Quantité (po largeur)	265,9	291,0	638,1	130,0	141,8
3ACCommon	0,454		149,0	135,2	803,0	280,5	64,4		233,6	242,8	415,7	73,6	0,0
<u>Maison</u>													
2	0,623	Quantité (po largeur)	185,3	11,1	92,7	11,1	0,0	Quantité (po largeur)	111,2	0,0	570,8	341,0	711,6
RIEN	0,553		0,0	0,0	1870,8	5,9	215,0		0,0	0,0	445,7	0,0	0,0
I	0,547		268,0	187,4	515,8	548,2	45,5		215,4	318,7	534,2	143,6	0,0
O	0,512		0,0	93,5	390,9	0,0	0,0		1045,2	1087,7	1155,7	0,0	0,0
S	0,279		237,6	451,4	221,7	0,0	0,0		728,5	300,9	411,8	0,0	0,0

En comparant les profils de classes NHLA, la classe *2Common* produit davantage de composants *S2F*, tandis que la classe *3ACCommon*, davantage de composants *S1F*. Comme la classe *2Common* est de qualité supérieure à celle de la classe *3ACCommon*, il est cohérent qu'elle produise plus de composants *S2F*.

Concernant les classes maison, on peut observer que les profils reflètent les caractéristiques de leur classe maison respective. Par exemple, si on prend la classe 2 qui doit avoir un composant principal exempt de défauts sur les deux faces et une longueur égale à au moins 75 % de celle du sciage (se référer au Tableau 2.5). Dans son profil, on peut voir que sa production de longs composants de qualité *S2F* est la plus grande parmi les profils, particulièrement pour les longs composants.

La classe *RIEN*, dont les sciages doivent avoir un composant principal de qualité *S1F* ayant au moins deux longueurs de plateau de table, génère relativement beaucoup de composants de longueurs suffisantes pour faire un seul plateau de table (essentiellement avec une longueur de 27,5 po), surtout de qualité *S1F*.

La classe *I*, version raccourcie de la classe *RIEN*, génère aussi beaucoup de composants pouvant entrer dans un plateau de table, mais la distribution est plus variée, dans les deux qualités.

La classe *O* génère beaucoup de courts composants de qualité *S2F*, tandis que la distribution des composants de la classe *S* est plus portée vers des longueurs plus courtes encore et vers la qualité *S1F*.

À noter que la classe maison *X* n'a pas été retenue pour l'étude, car elle est atypique et non gérée de la même façon que les autres classes.

Au final, le procédé de transformation du commanditaire peut être simulé avec ces profils. La prochaine section présente le modèle mathématique d'optimisation de l'approvisionnement.

5.2 Modèle d'optimisation

Un modèle d'optimisation a été développé pour trouver la quantité optimale de sciages de chaque classe pour fabriquer un carnet de commandes dans un procédé de fabrication de panneaux lamellés-collés. Mais avant de présenter la formulation mathématique de ce modèle, le voici sous forme de schéma à la Figure 5.2 :

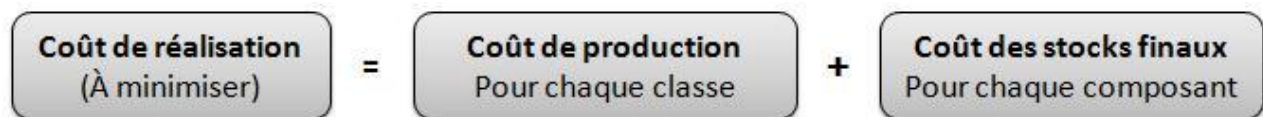


Figure 5.2. Schéma du modèle mathématique.

Le modèle permet donc de minimiser le coût réalisation d'un carnet de commandes donné en tenant compte du coût de production et du coût des stocks finaux.

Voici maintenant le modèle sous forme mathématique :

Fonction-objectif

$$\min Z = \sum_{i=1}^m C_i X_i + \sum_{j=1}^n S_j O_j$$

Sous les contraintes suivantes :

Contrainte de volume par classe

$$m_i \leq X_i \leq M_i \quad \text{pour } i = 1, \dots, m$$

$$b_j \leq O_j \leq B_j \quad \text{pour } j = 1, \dots, n$$

Non-négativité

$$C_i, X_i, S_i, O_j, m_i, M_i, b_j, B_j \geq 0$$

Où :

Z = coût de réalisation du carnet de commandes (\$)

i = indice pour la classe de sciages

j = indice pour le type de composants

m = nombre de classes de sciages

n = nombre de types de composants

C_i = coût de production de 1000 PMP d'une classe *i* (\$/1000)

X_i = volume d'une classe *i* requis pour réaliser le carnet de commandes (PMP)

S_j = coût de stockage d'un composant *j* (\$)

O_j = quantité de composants *j* en surplus

m_i = volume minimal disponible d'une classe *i* (PMP)

M_i = volume maximal disponible d'une classe *i* (PMP)

b_j = quantité minimale de composants *j* en surplus (unité)

B_j = quantité maximale de composants *j* en surplus (unité)

La fonction-objectif minimise la somme de deux multiplications : celle des coûts de production ($C_i X_i$) et celle des coûts de stockage ($S_i O_i$). Le coefficient de coût C_i inclut tous les coûts par volume pouvant être associés à une classe de sciages i : matière première, main d'œuvre directe et les frais généraux de fabrication imputés. La variable X_i représente le volume nécessaire d'une classe de sciages pour fabriquer le carnet de commandes. Le coefficient S_j représente le coût de stockages par volume d'un composant j . Il sert à mettre un coût à la surproduction O_i de chaque composant i qui doit être minimisée. En effet, dans une gestion d'entreprise dite *lean*, la surproduction est parmi le pire gaspillage qui soit : utilisation inappropriée de ressources humaines et de matériels, occupation d'espace nécessaire pour le stockage, manutention supplémentaire, administration additionnelle, etc. (Imai, 1997).

5.3 Outil d'optimisation de l'approvisionnement

Le modèle d'optimisation a été mis en œuvre dans un tableur *Excel*. Cette partie décrit l'outil ainsi créé. D'abord, les hypothèses sur lesquelles repose le modèle sont énumérées. Ensuite, l'organigramme représentant la programmation est présenté. Finalement, les différentes parties de l'organigramme, notamment les contraintes et la fonction-objectif, sont détaillées.

5.3.1 Hypothèses du modèle

L'outil d'optimisation créé repose sur des hypothèses. Celles-ci servent à simplifier la programmation et rendre possible l'obtention de résultats. Voici les hypothèses :

- Les facteurs du Tableau 1.1 autres que la classe de sciages ne sont pas pris en considération.
- Un nombre illimité de classes peuvent faire une combinaison.
- Carnet de commandes limité à 6 longueurs pour 2 qualités (*S1F* et *S2F*) de composants.
- Les profils de composants d'une classe sont stables d'un ensemble de sciages à l'autre.
- La génération de composants d'une combinaison de sciages varie linéairement selon les classes qui la composent.

- Un composant obtient obligatoirement la longueur la plus élevée possible parmi celles du carnet de commandes. Cette longueur ne peut pas prendre une valeur inférieure même pour combler plus rapidement un carnet. Voici un exemple avec un carnet possédant trois longueurs différentes de composants : 10, 20 et 30 pouces. Supposons que les quantités requises sont comblées pour les longueurs de 20 et 30 po. Alors, si un sciage permet la découpe de deux composants de 32 po et de 25 de long, ceux prendront obligatoirement une longueur respective de 30 et 20 po. Et ce même si les quantités requises par le carnet pour ces deux longueurs sont comblées.

Avec ces hypothèses, un organigramme de l'outil d'optimisation a été développé.

5.3.2 Organigramme

L'organigramme d'un programme informatique sert à illustrer les liens entre les constantes, les variables indépendantes et les variables dépendantes. D'un côté, les constantes sont spécifiées par l'utilisateur, de l'autre les variables indépendantes sont spécifiées par le solveur et représenteront la solution. Avec les constantes et les variables indépendantes, des variables dépendantes sont calculées. Ces variables peuvent représenter soit des états intermédiaires vers la fonction-objectif, qui est elle-même une variable dépendante, soit des indicateurs quelconques pertinents à l'utilisateur. La Figure 5.3 montre l'organigramme de l'outil d'optimisation de l'étude :

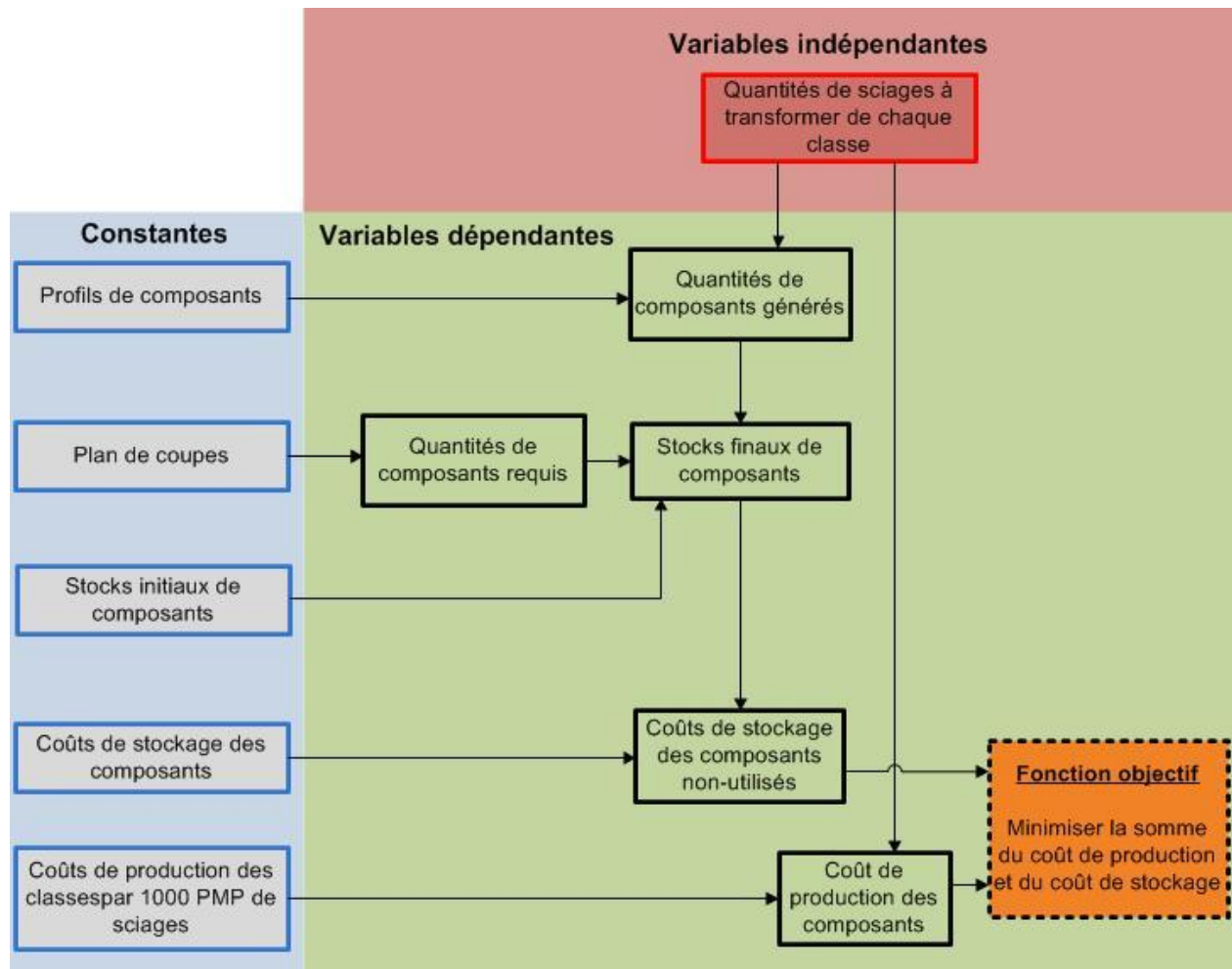


Figure 5.3. Organigramme du modèle.

Voici la description des différentes constantes et variables de l'organigramme.

5.3.2.1 Profils de composants

Le fonctionnement des profils a été expliqué dans la méthodologie. Par ailleurs, tous les sciages disponibles doivent être associés à au moins un profil pour être sélectionnés par le solveur.

5.3.2.2 Le carnet de commandes

Le carnet de commandes comprend les composants à fabriquer pour une période donnée. Les dimensions et la qualité des composants sont spécifiées. L'exemple de carnet présenté au Tableau 5.4 montre les quantités en pouces de largeur requises pour deux commandes. La première ne demande que des composants de la qualité *S1F*, tandis que la deuxième, que la qualité *S2F*.

Tableau 5.4. Exemple d'un carnet de commandes.

	S1F (po de largeur)					S2F (po de largeur)				
	10,00	17,50	27,50	47,50	72,50	10,00	17,50	27,50	47,50	72,50
Commande 1	953	1968	4307	1689	630					
Commande 2						953	1968	4307	1689	630
Σ	953	1968	4307	1689	630	953	1968	4307	1689	630

5.3.2.3 Stocks initiaux de composants

La nature de la matière première et du procédé de transformation fait en sorte qu'à la suite de tout carnet de commandes, une certaine quantité de composants générés n'est pas utilisée. Il faut alors les stocker pour une utilisation future. Le Tableau 5.5 montre un exemple de stocks initiaux.

Tableau 5.5. Exemple de stocks initiaux de composants.

Stock	Longueur (po) - Composant S1F					Longueur (po) - Composant S2F				
	10	17,5	27,5	47,5	72,5	10	17,5	27,5	47,5	72,5
Stock 1						2400				
Stock 2							50			
Stock 3					750					
Stock 4		300								
Stock 5									400	
Stock 6			900							
Stock 7								500		
Stock 8	500									
Stock 9						400				
Stock 10				1200						
Σ	500	300	900	1200	750	400	2400	50	500	400

5.3.2.4 Coûts de stockages des composants

Les coûts de stockages des composants représentent le coût de stockage par pouce de largeur des composants inutilisés. Il sert à mettre un coût à la surproduction qui doit être minimisée par la fonction-objectif. L'utilisateur peut adopter plusieurs stratégies. Ainsi, une grande valeur peut être attribuée pour une pièce de grand volume, car elle occupe un espace de stockage plus grand qu'une pièce moins volumineuse. Une autre stratégie serait d'utiliser le coût de revient des composants ou le revenu qui en est tiré. Ou encore, des valeurs reflétant la désirabilité des composants. Ainsi, la valeur donnée aux coefficients peut ne pas refléter un coût réel. C'est à l'utilisateur de choisir sa stratégie selon ses besoins en optimisation (Weiss & Thomas, 2005). S'il n'y a pas un besoin de minimiser les stocks finaux, des valeurs nulles peuvent être adaptées. Le Tableau 5.6 montre un exemple d'une stratégie de coûts uniformes pour tous les composants :

Tableau 5.6. Exemple de coûts de stockages des composants

	Longueur (po) - Composant S1F					Longueur (po) - Composant S2F				
	10	17,5	27,5	47,5	72,5	10	17,5	27,5	47,5	72,5
Coût (\$/po largeur)	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$

Donc, un pouce de largeur d'un composant surproduit pèse pour 1 \$ dans la fonction-objectif, peu importe sa longueur.

5.3.2.5 Coûts de production des profils

Le coût de production d'un profil inclut tous les coûts pouvant être associés à la transformation de 1000 PMP de sciages appartenant à un profil : matière première, main d'œuvre directe et les frais généraux de fabrication imputés. C'est à l'utilisateur d'inclure les coûts qu'il souhaite, s'il dispose des données pour le faire. Dans l'exemple du Tableau 5.7, on retrouve un exemple de coûts de production associés à des profils.

Tableau 5.7. Exemple de coûts de production.

Profil	Coût (1000 PMP)	Profil	Coût (1000 PMP)
<u>NHLA</u>		<u>Maison</u>	
FAS	1 430 \$	2	1 500 \$
F1F	1 424 \$	I	1 300 \$
FAS+Select	1 417 \$	O	1 000 \$
Select	1 410 \$	RIEN	700 \$
No.1Com	995 \$	S	350 \$
No.2ACom	760 \$		
No.2Com	725 \$		
No.2BCom	690 \$		
No.3ACom	650 \$		
No.3Com	500 \$		
No.3BCom	350 \$		

5.3.2.6 Quantités de sciages de chaque classe à transformer

L'organigramme comporte un ensemble de variables indépendantes représentant les quantités de sciages de chaque classe à transformer. C'est en utilisant les algorithmes qui lui sont intégrés que le solveur va déterminer la solution optimale pour des constantes données.

5.3.2.7 Les variables dépendantes

Les variables dépendantes sont calculées à partir de constantes, de variables indépendantes et d'autres variables dépendantes :

- Quantités de composants générés : représente la quantité générée, en pouce de largeur, de chaque longueur de composants.
- Coût de production des composants : représente le coût de production total des composants générés.
- Quantités de composants requis : représente la quantité requise, en pouce de largeur, par le carnet de commandes de chaque longueur de composants.
- Stocks finaux de composants : représente les quantités inutilisées, en pouce de largeur, de chaque composant.

- Coût de stockage des composants : représente le coût total relié aux stocks finaux.
- La fonction-objectif : représente la somme des coûts de production et de stockage. Doit être minimisée par le solveur.

5.3.2.8 Contraintes

Il y a des contraintes dans le modèle qui doivent être incluses dans la programmation. Ainsi, trois contraintes doivent être spécifiées : pour la quantité minimale et maximale de sciages disponibles par classe et pour la quantité minimale de stocks finaux à respecter.

Le Tableau 5.8 montre des valeurs pour les deux premières contraintes. Dans cet exemple, toutes les classes ont un minimum de 0 PMP de disponible. Quant au maximum, il varie, allant de 6000 PMP pour la classe *No.2ACommun* à 0 PMP pour le *3ACom*.

Tableau 5.8. Minimums et maximums pour les quantités de sciages à transformer.

Classe	Minimum (PMP)		Variable (PMP)		Maximum (PMP)
<u>NHLA</u>					
FAS	0	<=	757	<=	2000
F1F	0	<=	0	<=	2000
FAS+Select	0	<=	0	<=	3000
Select	0	<=	0	<=	2000
No.1Com	0	<=	0	<=	2000
No.2ACom	0	<=	994	<=	6000
No.2Com	0	<=	524	<=	2000
No.2BCom	0	<=	0	<=	2000
No.3ACom	0	<=	0	<=	0
No.3Com	0	<=	1941	<=	2000
No.3BCom	0	<=	0	<=	500
<u>Maison</u>					
2	0	<=	1129	<=	2000
I	0	<=	0	<=	800
O	0	<=	0	<=	2000
RIEN	0	<=	18	<=	950
S	0	<=	2000	<=	0

Pour la troisième contrainte, la quantité des stocks finaux de chaque composant doit être spécifiée. Évidemment, la valeur minimale est 0, car il est impossible de mettre une valeur négative. Toutefois, l'utilisateur pourrait vouloir préciser une valeur positive et non nulle pour diverses raisons, telle que maintenir des stocks minimaux pour faire face à d'éventuels imprévus.

5.3.2.9 Paramètre du solveur *Excel*

Voici dans la Figure 5.4, les paramètres du solveur qui ont été utilisés dans l'étude :

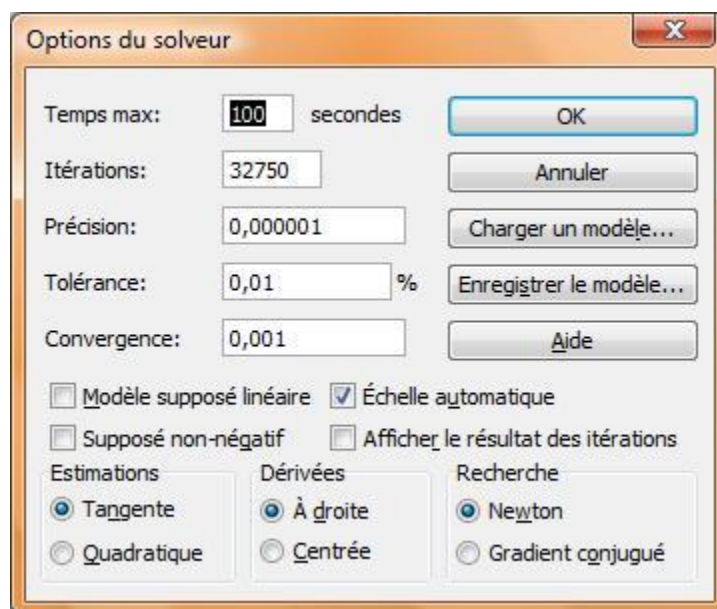


Figure 5.4. Paramètres du solveur utilisés pour l'étude.

Entre autres, un temps de 100 secondes et un nombre d'itérations de 32 750 (maximum permis) donnent le maximum de temps au solveur à trouver une solution satisfaisante. Concernant la linéarité, bien que le modèle mathématique soit linéaire, le solveur ne le reconnaît pas. Possiblement qu'un détail de la mise en œuvre du modèle dans *Excel* empêche le solveur de le supposé linéaire. Pour cette raison, la case « Modèle supposé linéaire » n'est pas activée. Toutefois, le logiciel n'éprouve aucune difficulté à trouver des solutions qu'il juge satisfaisantes.

CHAPITRE 6 CAS D'ÉTUDE

Un exercice d'optimisation de l'approvisionnement avec un carnet de commandes a été effectué avec l'outil. Les cinq premières sections décrivent les constantes de départ : les profils de composants, le carnet de commandes, les stocks initiaux, les coûts de stockage et les coûts de production. Ensuite vient la présentation des résultats obtenus par l'outil. Finalement, certains aspects de l'outil sont explorés : la possibilité de limiter le nombre de classes, les effets de la limite de sciages disponibles et les conséquences d'un changement de stratégie pour les coûts de stockage.

6.1 Profils de composants des classes de sciages

L'échantillon de sciages examinés a permis de créer des profils de composants (Tableau 5.3). Toutefois, ce n'est pas toutes les classes NHLA qui ont eu un profil de créé, car seules les classes *No.2Common* et *No.3ACommon* sont représentées dans l'échantillon. Comme il est intéressant de faire l'exercice avec un nombre maximal de choix pour former une combinaison optimale, les profils manquants ont été élaborés par l'auteur. Ce dernier s'est efforcé d'être cohérent avec les données de l'échantillon. L'élaboration a été faite en deux temps. Premièrement, l'auteur a créé les rendements pour chacune des classes manquantes. Deuxièmement, en respectant ces rendements, il a créé les quantités pour chaque composant de chaque classe manquante. Tous les profils sont présentés au Tableau 6.1 :

Tableau 6.1. Profils de composants utilisés dans l'exercice.

Classe	Rendement	Longueur (po) - Composant S1F					Longueur (po) - Composant S2F					
		10	17,5	27,5	47,5	72,5	10	17,5	27,5	47,5	72,5	
NHLA												
FAS	0,630	Quantité générée(po de largeur)	30,0	60,0	70,0	120,0	190,0	100,0	200,0	300,0	400,0	500,0
F1F	0,609		60,0	80,0	100,0	250,0	410,0	50,0	100,0	200,0	250,0	300,0
FAS+Select	0,574		105,0	95,0	190,0	200,0	195,0	125,0	200,0	320,0	270,0	340,0
Select	0,560		160,0	130,0	300,0	350,0	200,0	150,0	200,0	340,0	180,0	200,0
1Common	0,531		165,0	115,0	350,0	260,0	135,0	210,0	255,0	520,0	150,0	180,0
2ACommon	0,541		175,0	100,0	500,0	200,0	70,0	285,0	315,0	700,0	145,0	160,0
2Common	0,544		165,4	110,0	604,1	241,5	67,9	265,9	291,0	638,1	130,0	141,8
2BCommon	0,499		155,0	120,0	700,0	260,0	66,0	245,0	265,0	535,0	105,0	70,0
3ACommon	0,454		149,0	135,2	803,0	280,5	64,4	233,6	242,8	415,7	73,6	0,0
3Common	0,350		225,0	200,0	550,0	200,0	45,0	240,0	210,0	300,0	50,0	0,0
3BCommon	0,125	300,0	250,0	170,0	0,0	0,0	200,0	150,0	50,0	0,0	0,0	
Maison												
2	0,623	Quantité générée(po de largeur)	185,3	11,1	92,7	11,1	0,0	111,2	0,0	570,8	341,0	711,6
RIEN	0,553		0,0	0,0	1870,8	5,9	215,0	0,0	0,0	445,7	0,0	0,0
I	0,547		268,0	187,4	515,8	548,2	45,5	215,4	318,7	534,2	143,6	0,0
O	0,512		0,0	93,5	390,9	0,0	0,0	1045,2	1087,7	1155,7	0,0	0,0
S	0,279		237,6	451,4	221,7	0,0	0,0	728,5	300,9	411,8	0,0	0,0

En gras : données provenant de l'échantillon étudié.

6.2 Le carnet de commandes

Les carnets de commandes utilisés dans l'industrie présentent de grandes variétés de caractéristiques de composants telles que la qualité, la longueur, la largeur et la quantité à fabriquer. Pour cette étude, le carnet de commandes dit de *Buehlmann* a été utilisé. Ce carnet a été développé par Buehlmann (1998) et représente le carnet de commandes « moyen » de l'industrie et il est utilisé par plusieurs chercheurs dans le domaine. Il est montré au Tableau 6.2 :

Tableau 6.2. Carnet de commandes de *Buehlmann*.

Largeur (po)	Longueur (po)				
	10,0	17,5	27,5	47,5	72,5
1,50	136,0	297,0	433,0	243,0	10,3
2,50	152,0	298,0	480,0	262,0	98,0
3,50	46,0	102,0	146,0	88,0	57,0
4,25	49,0	99,0	458,0	85,0	40,0
Total	953,3	1968,3	4307,0	1688,8	630,0

Ce carnet de commandes spécifie la quantité requise de composants pour une longueur et une largeur données. Comme la présente étude a besoin d'un carnet de commandes pour la fabrication de panneaux lamellés-collés, le carnet de commandes de *Buehlmann* doit être modifié pour que les quantités spécifiées soient des pouces de largeur pour les longueurs voulues. Par conséquent, pour chaque longueur du carnet de commandes de *Buehlmann* est spécifiée une nouvelle quantité étant la somme des produits entre chacune des largeurs et leur quantité. Ces sommes sont présentées à la dernière ligne du Tableau 6.2. Ensuite, ces quantités sont demandées pour les deux types de qualité. Le nouveau carnet de commandes est illustré par le Tableau 6.3 :

Tableau 6.3. Carnet de commandes de l'exercice.

Qualité - S1F		Qualité - S2F	
Longueur (po)	Qté (po)	Longueur (po)	Qté (po)
10,00	953	10,00	953
17,50	1968	17,50	1968
27,50	4307	27,50	4307
47,50	1689	47,50	1689
72,50	630	72,50	630

C'est avec ce carnet que l'exercice a été réalisé.

6.3 Stocks initiaux

Les stocks initiaux de composants utilisés ont été générés par l'auteur. Les stocks du Tableau 5.5 ont été repris.

6.4 Coûts de stockages

Pour l'exercice, un coût uniforme a été donné pour tous les composants. Ce coût est de 1 \$ pour chaque composant surproduit, peu importe sa longueur et sa qualité. Les coûts du Tableau 5.6 ont été repris.

6.5 Coûts de production

Les coûts de production de l'exercice ne comprennent que le coût d'achat des sciages. Les données du Tableau 5.7 ont été reprises. Elles ont été élaborées par l'auteur en se basant sur des données provenant du marché (Hardwood Market Report, 2009) et du directeur de la production de panneaux lamellés-collés du commanditaire.

6.6 Résultats de l'exercice

Voici, dans le Tableau 6.4, le tableau de bord final avec la combinaison de sciages optimale :

Tableau 6.4. Résultats de l'exercice.

Classe	Choix (PMP)	Qté dispo (PMP)	Coût (1000 PMP)	S1F 10	Composants générés 17,5	27,5	47,5	72,5	S2F 10	Composants générés 17,5	27,5	47,5	72,5	Coût des sciages
FAS	0	0	2000 1 430 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
F1F	0	0	2000 1 424 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
FAS+Sel	0	0	3000 1 417 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
Select	0	764	6000 1 410 \$	122	99	229	268	153	115	153	260	138	153	= 1 078 \$
1Com	0	0	2000 995 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2ACom	0	0	6000 760 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2Com	0	0	2000 725 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2BCom	0	1101	10000 690 \$	171	132	771	286	73	270	292	589	116	77	= 760 \$
3ACom	0	0	0 650 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3Com	0	0	0 500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3BCom	0	500	500 350 \$	150	125	85	0	0	100	75	25	0	0	= 175 \$
2	0	0	2000 1 500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
I	0	7000	7000 1 300 \$	1876	1312	3610	3837	319	1508	2231	3739	1005	0	= 9 100 \$
O	0	0	2000 1 000 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
RIEN	0	0	950 700 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
S	0	0	0 350 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
Sciages utilisés : 9366 \$ 45450				2319	1668	4696	4391	544	1992	2751	4613	1258	230	= 11 113 \$
Coût unitaire de stockage				1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	
Stock initial				500	300	900	1200	750	400	2400	50	500	400	
Composants requis				953	1968	4307	1689	630	953	1968	4307	1689	630	
Composants générés				2319	1668	4696	4391	544	1992	2751	4613	1258	230	I Stocks finaux
Stock final				1865	0	1289	3902	664	1439	3183	356	70	0	= 12768
Stock minimal				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Coût de stockage
Coût stockage				1 865 \$	0 \$	1 289 \$	3 902 \$	664 \$	1 439 \$	3 183 \$	356 \$	70 \$	- \$	= 12 768 \$
PMP des composants				161	203	897	1448	274	138	334	881	415	116	= 4867
				Rendement		Coût combiné								
				52,0%		23 881 \$								

Voici les points saillants :

Tableau 6.5. Points saillants de l'exercice.

Élément	Valeur
Fonction-objectif	23 881 \$
Qté de sciages consommés	9366 PMP
Coût de production	11 113 \$
Coût des stocks finaux	12 768 \$

La combinaison optimale comporte quatre classes différentes : *Select*, *No2BCommon*, *No.3BCommon* et *I*. La quantité de sciages requise est de 9366 PMP ayant un coût de production de 11 113 \$ et occasionnant pour 12 768 \$ de stocks finaux. Ces coûts additionnés donnent à la fonction-objectif une valeur de 23 881 \$.

Pour un fabricant comme le commanditaire qui a l'habitude de classer maison tous les sciages, il est intéressant de voir qu'il n'est pas nécessaire d'agir ainsi. La combinaison optimale comporte trois classes NHLA représentant 2366 PMP, il n'est donc pas nécessaire de classer maison ces sciages. Des activités consommatrices de ressources (matériel, équipement, personnel) peuvent être ainsi évitées.

6.7 Limitation du nombre de classes

Comme une diminution du nombre de classes peut être souhaitée par le fabricant, l'utilisateur peut refaire l'exercice en mettant une valeur nulle à la quantité de sciages disponibles de certaines classes. À partir de la combinaison optimale préalablement obtenue, il peut mettre une valeur nulle aux classes ne participant pas à la combinaison, pour les exclure définitivement, et à une ou plusieurs classes de la combinaison optimale préalablement obtenue, selon son souhait. Ainsi, en mettant une quantité nulle pour la classe *Select*, une nouvelle combinaison à trois classes est obtenue et les résultats sont présentés au Tableau 6.6 :

Tableau 6.6. Résultats de l'exercice visant à limiter le nombre de classes.

Classe	Choix (PMP)	Qté dispo (PMP)	Coût (1000 PMP)	S1F 10	Composants générés					S2F 10	Composants générés					Coût des sciages
				10	17,5	27,5	47,5	72,5		10	17,5	27,5	47,5	72,5		
FAS	0	0	1 430 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$	
F1F	0	0	1 424 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$	
FAS+Sel	0	0	1 417 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$	
Select	0	0	1 410 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$	
1Com	0	0	995 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$	
2ACom	0	0	760 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$	
2Com	0	0	725 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$	
2BCom	0	3285	10000 690 \$	509	394	2300	854	217	805	871	1757	345	230	= 2 267 \$		
3ACom	0	0	650 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$		
3Com	0	0	500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$		
3BCom	0	500	500 350 \$	150	125	85	0	0	100	75	25	0	0	= 175 \$		
2	0	0	1 500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$		
1	0	6132	7000 1 300 \$	1643	1149	3163	3361	279	1321	1954	3275	881	0	= 7 971 \$		
0	0	0	1 000 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$		
RIEN	0	0	700 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$		
\$	0	0	350 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$		
Σ	9917	Σ 17500		2302	1668	5547	4215	496	2226	2900	5058	1226	230	= 10 413 \$		
Coût unitaire de stockage				1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$		
Stock initial				500	300	900	1200	750	400	2400	50	500	400			
Composants requis				953	1968	4307	1689	630	953	1968	4307	1689	630			
Composants générés				2302	1668	5547	4215	496	2226	2900	5058	1226	230	Σ Stocks finaux		
Stock final				1849	0	2140	3727	616	1672	3332	801	37	0	= 14173		
Stock minimal				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Coût de stockage		
Coût stockage				1 849 \$	0 \$	2 140 \$	3 727 \$	616 \$	1 672 \$	3 332 \$	801 \$	37 \$	- \$	= 14 173 \$		
PMP des composants				160	203	1059	1390	250	155	352	966	404	116	= 5055		
														Rendement	Coût combiné	
														51,0%	Σ 24 586 \$	

6.8 Sans limite de sciages disponibles

Il est intéressant de refaire l'exercice avec des ressources en sciages illimitées pour obtenir une solution utilisant la meilleure combinaison de sciages possibles sans contrainte de ressources. Le Tableau 6.8 montre le tableau de bord de cet exercice :

Tableau 6.8. Résultats de l'exercice sans limite de sciages disponibles.

Classe	Choix (PMP)	Qté dispo (PMP)	Coût (1000 PMP)	S1F Composants générés					S2F Composants générés					Coût des sciages
				10	17,5	27,5	47,5	72,5	10	17,5	27,5	47,5	72,5	
FAS	0	1736	999999 1 430 \$	52	104	121	208	330	174	347	521	694	868	= 2 482 \$
F1F	0	0	999999 1 424 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
FAS+Sel	0	0	999999 1 417 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
Select	0	0	999999 1 410 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
1Com	0	0	999999 995 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2ACom	0	3410	999999 760 \$	597	341	1705	682	239	972	1074	2387	494	546	= 2 592 \$
2Com	0	0	999999 725 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2BCom	0	0	999999 690 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3ACom	0	0	999999 650 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= 0 \$
3Com	0	0	999999 500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3BCom	0	0	999999 350 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2	0	0	999999 1 500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
1	0	0	999999 1 300 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
0	0	0	999999 1 000 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
RIEN	0	524	999999 700 \$	0	0	980	3	113	0	0	233	0	0	= 367 \$
\$	0	2710	999999 350 \$	644	1223	601	0	0	1974	815	1116	0	0	= 948 \$
Sciages utilisés : 8379				1293	1668	3407	893	681	3120	2237	4257	1189	1413	= 6 389 \$
Coût unitaire de stockage				1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	1,00 \$	
Stock initial				500	300	900	1200	750	400	2400	50	500	400	
Composants requis				953	1968	4307	1689	630	953	1968	4307	1689	630	
Composants générés				1293	1668	3407	893	681	3120	2237	4257	1189	1413	Σ Stocks finaux
Stock final				839	0	0	405	801	2566	2668	0	0	1184	= 8463
Stock minimal				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Coût de stockage
Coût stockage				839 \$	0 \$	0 \$	405 \$	801 \$	2 566 \$	2 668 \$	0 \$	0 \$	1 184 \$	= 8 463 \$
PMP des composants				90	203	651	295	343	217	272	813	392	712	= 3986
				Rendement		Coût combiné								
				47,6%		14 852 \$								

Voici les points saillants :

Tableau 6.9. Points saillants de l'exercice sans limite de sciages disponibles.

Élément	Valeur
Fonction-objectif	14 852 \$
Qté de sciages consommés	8379 PMP
Coût de production	6 389 \$
Coût des stocks finaux	8 463 \$

Le Tableau 6.9 montre une solution nettement plus optimale que la solution de l'exercice initial. Une minimisation d'environ 40 % de la fonction-objectif, d'environ 10 % de la quantité de

sciages consommée, d'environ 23 % du coût de production et d'environ 35% des stocks finaux. Ce type de résultats est intéressant pour le fabricant, car il peut l'aider dans ses décisions visant l'achat et la gestion des stocks de sciages. Pour la réalisation d'un carnet de commandes donné, il peut voir les conséquences de ne pas avoir telles classes de sciages en quantité suffisante et les coûts supplémentaires en découlant.

6.9 Changement de stratégie pour les coûts de stockage

Changer de stratégie pour les coûts de stockage occasionne des solutions différentes. Un exercice adoptant une stratégie de coût en escalier a été réalisé. En ce sens, une structure de coûts a été faite en se basant sur un coût de 1 \$ le PMP. Le Tableau 6.10 montre cette structure de coûts :

Tableau 6.10. Structure en escalier des coûts de stockage.

	Longueur (po) - Composant S1F					Longueur (po) - Composant S2F				
	10	17,5	27,5	47,5	72,5	10	17,5	27,5	47,5	72,5
Coût (\$/po largeur)	0,07 \$	0,12 \$	0,19 \$	0,33 \$	0,50 \$	0,07 \$	0,12 \$	0,19 \$	0,33 \$	0,50 \$

Avec cette structure, un exercice a été effectué avec l'outil et le Tableau 6.11 montre le tableau de bord obtenu :

Tableau 6.11. Résultats de l'exercice avec des coûts de stockage en escalier.

Classe	Choix (PMP)	Qté dispo (PMP)	Coût (1000 PMP)	S1F 10	Composants générés					S2F 10	Composants générés					Coût des sciages
FAS	0	0	2000	1 430 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
F1F	0	0	2000	1 424 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
FAS+Sel	0	0	3000	1 417 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
Select	0	0	6000	1 410 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
1Com	0	0	2000	995 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2ACom	0	0	6000	760 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2Com	0	0	2000	725 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2BCom	0	3285	10000	690 \$	509	394	2299	854	217	805	871	1757	345	230	=	2 267 \$
3ACom	0	0	0	650 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3Com	0	0	0	500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3BCom	0	500	500	350 \$	150	125	85	0	0	100	75	25	0	0	=	175 \$
2	0	0	2000	1 500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
1	0	6132	7000	1 300 \$	1643	1149	3163	3361	279	1321	1954	3275	881	0	=	7 971 \$
0	0	0	2000	1 000 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
RIEN	0	0	950	700 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
\$	0	0	0	350 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
Sciages utilisés : 9917				Σ 45450	2302	1668	5547	4215	496	2226	2900	5058	1226	230	=	10 413 \$
Coût unitaire de stockage					0,07 \$	0,12 \$	0,19 \$	0,33 \$	0,50 \$	0,07 \$	0,12 \$	0,19 \$	0,33 \$	0,50 \$		
Stock initial				500	300	900	1200	750	400	2400	50	500	400			
Composants requis				953	1968	4307	1689	630	953	1968	4307	1689	630			
Composants générés				2302	1668	5547	4215	496	2226	2900	5058	1226	230			Σ Stocks finaux
Stock final				1849	0	2140	3727	616	1672	3332	801	37	0	=		14173
Stock minimal				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	=		Coût de stockage
Coût stockage				128 \$	(0) \$	409 \$	1 229 \$	310 \$		116 \$	405 \$	153 \$	12 \$	(0) \$	=	2 763 \$
PMP des composants				160	203	1059	1390	250		155	352	966	404	116	=	5055
																Rendement
																51,0% Σ
																Coût combiné
																13 176 \$

Voici les points saillants :

Tableau 6.12. Points saillants de l'exercice avec des coûts de stockage en escalier.

Élément	Valeur
Fonction-objectif	13 176 \$
Qté de sciages consommés	9917 PMP
Coût de production	10 413 \$
Coût des stocks finaux	14 173 \$

La fonction-objectif ne peut pas être comparée avec les résultats précédents, car la base du calcul des coûts de stockage a été changée. Quant à la quantité de sciages consommés et la somme des stocks finaux, elles ont augmenté, car la nouvelle structure de coûts restreint beaucoup moins la consommation des sciages et la surproduction. En effet, le coût le plus élevé, soit 0,50 \$ par pouce de largeur pour les composants de 72½ po de longueur, est la moitié du coût uniforme de l'exercice initial, soit 1 \$ par pouce de largeur pour toutes les longueurs. Une autre conséquence des coûts de stockage moins restreignant, l'outil favorise une consommation plus grande de

sciages à prix inférieur qu'une consommation plus restreinte de sciages plus dispendieux, mais plus adaptée au carnet de commandes.

Il existe d'autres stratégies pour les coûts de stockage. C'est à l'utilisateur de choisir la stratégie collant le mieux à l'atteinte de ses objectifs en optimisation.

CHAPITRE 7 CONCLUSION

La première section de ce chapitre énumère les principaux résultats obtenus. La deuxième section décrit les différentes limites de l'étude. La dernière section présente les perspectives de la recherche effectuée.

7.1 Principaux résultats

Cette étude montre qu'il a été possible de développer un nouvel outil d'optimisation de l'approvisionnement en sciage pour la fabrication de panneaux lamellés-collés. Plus spécifiquement, le nouvel outil a été développé pour le procédé de transformation du commanditaire. Il utilise un concept nouveau qu'est le profil de composants. Celui-ci simule le procédé de fabrication en spécifiant les quantités de composants attendues pour une combinaison de sciages donnée. Un profil est associé à chacune des classes de sciages disponibles pour la transformation.

Un résultat remarquable est la possibilité d'avoir des sciages d'une classe NHLA dans la combinaison optimale. Ainsi, un fabricant ayant l'habitude de classer maison tous les sciages achetés voit ici l'opportunité d'éviter cette activité pour une partie des sciages. Du coup, des ressources sont épargnées.

De plus, il est possible de limiter le nombre de classes de sciages entrant dans l'approvisionnement optimal. En effet, il est possible qu'un fabricant désire limiter le nombre de classes pour faciliter la manutention et la gestion.

Aussi, en enlevant la contrainte visant les quantités de sciages disponibles pour chacune des classes, il est possible d'obtenir une solution optimale donnant de précieuses informations quant à la gestion des stocks de sciages. En effet, le fabricant peut comparer les classes requises pour la

solution optimale avec les classes en stock et voir si des correctifs doivent être apportés quant à la gestion des stocks de sciages.

Finalement, les conséquences du choix d'une stratégie de gestion des stocks finaux de composants peuvent être appréciées. En effet, l'utilisateur peut adapter l'outil pour mettre en place la stratégie voulue.

7.2 Limites de l'étude

Cette section présente les différentes limites de l'étude. Il est question de limites touchant les profils de composants, le coût de production, la simulation du procédé, les valeurs initiales des variables indépendantes et les solutions sous-optimales.

7.2.1 Profils de composants

Le concept de profils de composants dans le domaine de la transformation du bois est inédit. À la connaissance de l'auteur, sa capacité à simuler ou prédire adéquatement les composants résultants d'un approvisionnement n'a jamais été validée.

7.2.2 Coût de production

Les coûts de production utilisés dans le cas d'étude comprennent uniquement la portion du coût d'approvisionnement. Le coût d'approvisionnement augmente avec la qualité de la classe NHLA. Ce comportement est l'inverse du coût de transformation qui diminue lorsque la qualité augmente (X. Zuo, et al., 2003). Ainsi, les coûts de production utilisés dans l'étude omettent un élément important qui est le coût de transformation des sciages. Un fabricant a intérêt à inclure cet élément de même que les coûts de main d'œuvre directe et les frais généraux de fabrication imputés.

7.2.3 Simulation du procédé

Parmi les hypothèses de l'outil, il y a la suivante : la longueur d'un composant prend la valeur la plus élevée possible du carnet de commandes. Chez le commanditaire toutefois, un composant ne prend pas toujours la valeur la plus élevée. La règle ressemble davantage à ceci : la longueur prend la valeur la plus élevée parmi les longueurs des composants du carnet de commandes qui restent à fabriquer. Par conséquent, les solutions de l'outil prennent davantage de sciages que le procédé du commanditaire, car il ne s'adapte pas au carnet de commandes durant la fabrication. Aussi, il occasionne plus de stocks finaux. Toutefois, l'utilisation de la matière est plus optimale et le rendement plus élevé. La création d'un outil respectant la pratique réelle est tout à fait possible, mais nécessite davantage de programmation et possiblement un solveur plus performant.

7.2.4 Valeurs initiales des variables indépendantes

Le solveur intégré dans *Excel* permet de résoudre des problèmes d'optimisation linéaire et légèrement non linéaire. C'est un solveur de base dont les limites peuvent être rapidement atteintes (Frontline Systems, 2003).

Durant l'étude, les limites ont parfois été atteintes. Ces effets ont été remarqués lorsque les valeurs de départ des variables indépendantes sont différentes d'un exercice à l'autre. Le Tableau 7.1 et le Tableau 7.2 montrent un exemple :

Tableau 7.1. Résultats avec des valeurs de départ nulles pour les variables indépendantes.

Classe	Choix (PMP)	Qté dispo (PMP)	Coût (1000 PMP)	S1F 10	Composants générés 17,5	27,5	47,5	72,5	S2F 10	Composants générés 17,5	27,5	47,5	72,5	Coût des sciages
FAS	0	0	2000 1 430 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
F1F	0	0	2000 1 424 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
FAS+Sel	0	0	3000 1 417 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
Select	0	0	6000 1 410 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
1Com	0	840	2000 995 \$	139	97	294	219	113	176	214	437	126	151	= 836 \$
2ACom	0	0	6000 760 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2Com	0	0	2000 725 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2BCom	0	1124	10000 690 \$	174	135	787	292	74	275	298	601	118	79	= 775 \$
3ACom	0	0	0 650 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3Com	0	0	0 500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3BCom	0	500	500 350 \$	150	125	85	0	0	100	75	25	0	0	= 175 \$
2	0	0	2000 1 500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
I	0	7000	7000 1 300 \$	1876	1312	3610	3837	319	1508	2231	3739	1005	0	= 9 100 \$
O	0	0	2000 1 000 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
RIEN	0	0	950 700 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
S	0	0	0 350 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
Sciages utilisés :	9464	Σ	45450	2339	1668	4776	4348	506	2060	2818	4802	1249	230	= 10 887 \$
Coût unitaire de stockage				0,35 \$	0,61 \$	0,95 \$	1,65 \$	2,52 \$	0,35 \$	0,61 \$	0,95 \$	1,65 \$	2,52 \$	
Stock initial				500	300	900	1200	750	400	2400	50	500	400	
Composants requis				953	1968	4307	1689	630	953	1968	4307	1689	630	
Composants générés				2339	1668	4776	4348	506	2060	2818	4802	1249	230	Σ Stocks finaux
Stock final				1885	0	1369	3859	626	1506	3250	545	61	0	= 13102
Stock minimal				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Coût de stockage
Coût stockage				655 \$	0 \$	1 307 \$	6 365 \$	1 577 \$	523 \$	1 975 \$	521 \$	100 \$	(0) \$	= 13 022 \$
PMP des composants				162	203	912	1434	255	143	343	917	412	116	= 4897
												Rendement		51,7%
												Coût combiné		Σ 23 909 \$

Tableau 7.2. Résultats avec des valeurs très grandes pour les variables indépendantes.

Classe	Choix (PMP)	Qté dispo (PMP)	Coût (1000 PMP)	S1F 10	Composants générés 17,5	27,5	47,5	72,5	S2F 10	Composants générés 17,5	27,5	47,5	72,5	Coût des sciages
FAS	0	0	2000 1 430 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
F1F	0	0	2000 1 424 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
FAS+Sel	0	0	3000 1 417 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
Select	0	0	6000 1 410 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
1Com	0	176	2000 995 \$	29	20	61	46	24	37	45	91	26	32	= 175 \$
2ACom	0	0	6000 760 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2Com	0	0	2000 725 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
2BCom	0	1751	10000 690 \$	271	210	1226	455	116	429	464	937	184	123	= 1 208 \$
3ACom	0	0	0 650 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3Com	0	0	0 500 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
3BCom	0	500	500 350 \$	150	125	85	0	0	100	75	25	0	0	= 175 \$
2	0	106	2000 1 500 \$	20	1	10	1	0	12	0	61	36	76	= 160 \$
I	0	7000	7000 1 300 \$	1876	1312	3610	3837	319	1508	2231	3739	1005	0	= 9 100 \$
O	0	0	2000 1 000 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
RIEN	0	0	950 700 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
S	0	0	0 350 \$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	= - \$
Sciages utilisés :	9533	Σ	45450	2346	1668	4992	4339	458	2086	2815	4853	1252	230	= 10 818 \$
Coût unitaire de stockage				0,35 \$	0,61 \$	0,95 \$	1,65 \$	2,52 \$	0,35 \$	0,61 \$	0,95 \$	1,65 \$	2,52 \$	
Stock initial				500	300	900	1200	750	400	2400	50	500	400	
Composants requis				953	1968	4307	1689	630	953	1968	4307	1689	630	
Composants générés				2346	1668	4992	4339	458	2086	2815	4853	1252	230	Σ Stocks finaux
Stock final				1893	0	1585	3851	578	1532	3247	596	63	0	= 13345
Stock minimal				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Coût de stockage
Coût stockage				657 \$	(0) \$	1 514 \$	6 351 \$	1 455 \$	532 \$	1 973 \$	569 \$	104 \$	(0) \$	= 13 155 \$
PMP des composants				163	203	953	1431	231	145	342	927	413	116	= 4923
												Rendement		51,6%
												Coût combiné		Σ 23 973 \$

Et le Tableau 7.3 présente les points saillants des exercices comparés :

Tableau 7.3. Comparaison des points saillants des exercices.

Élément	Valeurs initiales nulles	Valeurs initiales très grandes	Différence	Différence (%)
Fonction-objectif	23 909 \$	23 973 \$	- 64 \$	- 0,3 %
Qté de sciages consommés	9464 PMP	9533 PMP	+ 69 PMP	+ 0,7 %
Coût de production	10 887 \$	10 818 \$	- 70 \$	- 0,6 %
Coût des stocks finaux	13 102 \$	13 345 \$	+ 243 \$	+ 1,8 %

Le Tableau 7.3 montre que les différences observées sont de moins de 2 %. C'est à l'utilisateur d'être attentif aux limites du solveur qu'il utilise et de les gérer. Au besoin, de prendre un solveur plus puissant parmi ceux offerts sur le marché.

7.2.5 Solutions sous-optimales

L'outil d'optimisation utilise une contrainte représentant les quantités de sciages disponibles pour la fabrication. À cause de cette contrainte, une solution sous-optimale peut en résulter. Ainsi, la façon dont un gestionnaire gère les stocks de sciages a une répercussion sur la solution optimale trouvée. S'il a maintenu en stock les sciages les moins aptes à la fabrication d'un carnet de commandes donnée, la solution optimale peut ne pas être satisfaisante. Toutefois, en mettant les ressources en sciages illimitées, la solution tend vers la solution optimale et peut donner de précieuses indications au fabricant sur la gestion des stocks de sciages. Des indications comme les classes et les quantités de sciages à acheter pour maintenir des stocks favorisant des solutions optimales.

7.3 Perspectives

Cette section discute des perspectives offertes par cette étude. Elle aborde les points suivants : les profils de composants, les combinaisons de sciages, la validation expérimentale, le carnet de commandes, la validation expérimentale et la simulation de procédé.

7.3.1 Profils de composants

Comme mentionné dans la section 8.2.1, le concept de profils de composants est inédit. Sa capacité à simuler un procédé de transformation, particulièrement celui du commanditaire, pourrait être étudiée et validée. De plus, il serait important d'étudier les conditions dans lesquelles les échantillons atteignent une représentativité suffisante pour prédire les composants résultants.

7.3.2 Combinaisons de sciages

L'outil d'optimisation repose sur une hypothèse linéaire entre la génération de composants et les combinaisons de sciages. Une hypothèse semblable, soit une variation linéaire entre le rendement et les combinaisons de sciages, a déjà été utilisée dans des programmes, tel *RIP-X*, largement utilisé dans l'industrie forestière (Buck, 2009). Bien qu'elle ait été infirmée par Zuo et al. (2004), le logiciel *RIP-X* reproduit, malgré tout, adéquatement les procédés réels (Harding & Steele, 1997). Pour l'hypothèse linéaire de cette étude, elle reste à être étudiée et validée.

7.3.3 Validation expérimentale

La capacité d'un logiciel de simulation à reproduire fidèlement les procédés réels doit être validée. C'est le cas de *ROMI-3* (Thomas & Weiss, 2006) et de *O2A* (Caron, 2003). Pour l'outil d'optimisation développé dans cette étude, il n'a pu être validé avec le procédé du commanditaire. La raison est que l'outil développé repose sur des hypothèses qui ne permettent pas de simuler fidèlement chacune des activités de transformation présentes chez le commanditaire. Il serait intéressant de poursuivre le développement de l'outil pour arriver à faire une validation avec un procédé existant.

7.3.4 Carnet de commandes

ROMI-3 permet de considérer des carnets de commandes similaires à ceux de l'industrie (Weiss & Thomas, 2005) selon la qualité et les dimensions des composants. Dans l'étude, le carnet de commandes utilisé, basé sur le carnet de commandes de *Buehlmann*, était limité à 12 composants différents, soient deux qualités de 6 longueurs différentes. Chez le commanditaire, les carnets de commandes comportent essentiellement deux qualités, mais beaucoup plus de longueurs différentes. Toutefois, un carnet comprenant un grand nombre de composants différents est envisageable avec le solveur d'*Excel*, bien qu'il y ait un nombre maximal. Au besoin, prendre un autre solveur plus puissant. En changeant ainsi le carnet de commandes, il faut modifier en conséquence les profils de composants pour qu'ils tiennent compte des nouveaux composants où une quantité générée doit être spécifiée.

7.3.5 Simulation de procédé

Par ailleurs, il ne faut pas oublier qu'un avantage d'un outil de simulation est de pouvoir tester des hypothèses sans subir l'influence de facteurs « parasites. » Les interactions entre les classes de sciages, les paramètres des équipements, les requis du carnet de commandes et d'autres facteurs rendent incertaine la prédiction des effets d'un seul changement. De petits changements provoquent souvent des conséquences inattendues et indésirables (Buehlmann, 1998). Cet avantage, toutefois, fait en sorte qu'une solution optimale d'approvisionnement trouvée à l'aide de l'outil d'optimisation peut ne pas donner les résultats attendus lorsque réalisée dans un vrai possédé. C'est à l'utilisateur de tenir compte de l'effet des facteurs parasites modifiant les résultats.

GLOSSAIRE

Bille	« Tout tronçon un peu important d'une grume, après que l'on a procédé au tronçonnage. » (OQLF)
Classe	« Subdivision d'un classement relatif au bois, en fonction de critères qualitatifs. La quantité de nœuds et de fentes de même que la couleur peuvent être des critères servant au classement. » (OQLF)
Composant	Les composants en bois sont des éléments entrant dans la composition d'une vaste gamme de produits finis (meubles, portes, cercueils, palettes, clôtures, etc.) (Douville, Filion, Boudreault, & Bouchard, 2008).
Composant principal	Composant le plus long que donne un sciage.
Déclignage	« Opération qui consiste à éliminer les rives flacheuses, soit par traits de scie parallèles perpendiculaires aux faces d'un plateau ou d'une planche, soit au moyen de têtes de déchiquetage, produisant des planches de largeur prédéterminée et uniforme sur toute leur longueur. » (OQLF)
Éboutage	« Opération qui consiste à couper des planches de bois en bouts de différentes longueurs et à éliminer les défauts. » (OQLF)
Face	Représente les deux faces parallèles ayant les plus grandes superficies d'une planche. Par opposition aux rives.
Grume	« Tout bois abattu, non écorcé, mais ébranché, propre à fournir du bois d'œuvre. » (OQLF)
Plateau	Élément horizontal ou dessus de la table.

Rive	Représente les deux faces parallèles ayant les plus petites superficies d'une planche.
Sciage	« Bois scié à quelques dimensions que ce soit, avec ou sans flaches. » (OQLF)
Scie à refendre	« Scie circulaire ou à ruban conçue pour scier dans la direction des fibres du bois. » (OQLF)

BIBLIOGRAPHIE

- American Hardwood Export Council. (2008). *The Illustrated Guide to American Hardwood Lumber Grade*. American Hardwood Export Council, . Consulté le 17 juin 2010, tiré de http://www.americanhardwood.org/fileadmin/docs/publications/english/ENGLISH_LUMBER_LO.pdf.
- Anonyme. (1985). The rough mill - improving yield. *Furniture Design & Manufacturing*, 57(12), 48-60.
- Beauregard, R., Bouthillier, L., D'Amour, F., D'Amour, S., Frayret, J., & LeBel, L. (2004). *Mémoire sur la Comission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise*: FORAC et la Faculté de foresterie et de géomatique de l'Université Laval. http://www.forac.ulaval.ca/fileadmin/docs/Publications/Comission_Coulombe.pdf
- Bouffard, J.-F. (2005). *Comparaison des procedes de debitage secondaire selon une optimisation sur la surface et en valeur* (Universite Laval, Québec).
- Buck, R. (2009). *Integrating the Least-Cost Grade-Mix Solver into ROMI* (M.Sc., Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia).
- Buehlmann, U. (1998). *Understanding the relationship of lumber yield and cutting bill requirements: A statistical approach* (Ph.D., Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA). <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=732996591&Fmt=7&clientId=43390&RQT=309&VName=PQD> (UMI No. 9911822)
- Buehlmann, U., Zuo, X., & Thomas, R. E. (2004). Linear programming and optimizing lumber quality composition in secondary hardwood dimension mills. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part B -- Engineering Manufacture*, 218(1), 143-147.
- Buehlmann, U., Zuo, X., & Thomas, R. E. (2008). Performance evaluation of the least-cost lumber grade-mix solver. *Wood and fiber science*, 40, 427-435.
- Caron, M. (2001). *Optimiseur 2 axes : Manuel de l'utilisateur*. Sainte-Foy, Québec: Centre de Recherche Industrielle du Québec.
- Caron, M. (2003). *Comparaison de l'optimisation selon le prix et selon de rendement matiere dans les usines de debitage de composants de bois franc* (M.Sc., Université Laval, Québec, Canada). <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=766574511&Fmt=7&clientId=43390&RQT=309&VName=PQD> (UMI No. MQ83234)
- Crissey, J. (2003). Competing in a global marketplace - How to avoid losing U.S. furniture manufacturing completely. *Modern Woodworking*.
- Deschênes, H. (1986). *Utilisation et transformation des bois*. Mont-Royal, Québec: Modulo.
- Deschênes, H., Barry, A., Browne, T., Chtourou, H., Fortin, Y., Hernandez, R., et al. (2009). Procédé de transformation du bois. In *Manuel de foresterie* (2 éd., pp. 1365-1462). Québec: Éditions MultiMondes.

- Douville, G., Filion, S., Boudreault, A., & Bouchard, M. (2008). *Profil des produits forestiers - Deuxième transformation - Composants en bois*. Québec, Québec: Ministère des ressources naturelles du Québec. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/composants-bois.pdf>
- Dupont, D. (2006). *Système d'analyse d'équarris - Équarris produits par une équarisseuse dans une usine de sciage de bois résineux*. Consulté le 29 juillet 2010, tiré de http://www.icriq.com/fr/productique_tfp/equarris_2006_04_27.html.
- Englerth, G. H., & Schumann, D. R. (1969). *Charts for calculating dimension yields from hard maple lumber*. Madison, Wisconsin: USDA Forest Service.
- Frontline Systems. (2003). *User Guide : Premium Solver, Premium Solver Platform*. Incline Village, NV: Frontline Systems.
- Gatchell, C. J. (1985). Impact of rough-mill practices on yields. In *Eastern Hardwood : the source, the industry, and the market* (pp. 146-156). Harrisburg, PA.: White, J. C.
- Gatchell, C. J., Thomas, R. E., & Walker, E. S. (1998). *1998 data bank for kiln-dried red oak lumber*. Radnor, PA: USDA Forest Service, Northeastern Research Station.
- Harding, O. V., & Steele, P. H. (1997). RIP-X: Decision software to compare crosscut-first and rip-first rough mill systems. *Wood science and technology*, 31(5), 367.
- Hardwood Market Report. (2009). *Hardwood Market Report* (Volume 87, Number 22). Memphis, TN: Hardwood Market Report. Consulté le 16 juillet 2010, tiré de <http://www.hmr.com/Uploads/book2.pdf>
- Imai, M. (1997). *Gemba kaizen : a common sense, low-cost approach to management*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Lawson, P. S., Thomas, R. E., & Walker, E. S. (1996). *OPTIGRAMI V2 user's guide*. Radnor, Pa.: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
- Lihra, T., Bouffard, J.-F., Caron, M., Côté, S., Dessureault, Y., Guillemette, A., et al. (2009). Produits d'apparence. In *Manuel de foresterie* (2 éd., pp. 1483-1502). Québec: Éditions MultiMondes.
- MDEIE. (2007). *Profil de l'industrie québécoise du meuble*. Québec, Québec: Ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation. Consulté le 22 juillet 2010, tiré de http://www.mdeie.gouv.qc.ca/fileadmin/contenu/publications/portraits_industriels/industrie_meuble.pdf
- MRNF. (2003). *Profil des produits forestiers - Deuxième transformation - Approvisionnement en bois massif pour l'industrie québécoise du meuble*. Québec, Québec: Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/ApprovBoismassifMeuble.pdf>
- MRNF. (2010). *Ressources et industries forestières - Portrait statistiques*. Québec, Québec: Ministère des ressources naturelles et de la faune du Québec. Consulté le 22 juin 2010, tiré de <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques-complete.jsp>
- NHLA. (2007). *Rules for the measurement and inspection of hardwood and cypress*. Memphis, TE: NHLA.

- OQLF. *Grand dictionnaire terminologique*. Consulté le 20 juillet 2010, tiré de <http://www.granddictionnaire.com>.
- Pouliot, R. (2006). *Nomenclature de la première transformation et de la deuxième et troisième transformation des produits forestiers*. Québec, Québec, Canada: Ressources naturelles et faune Québec, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers. Consulté le 4 juin 2010, tiré de <http://www.mrn.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/nomenclature.pdf>
- Rancourt, V. (2004). *Evaluation et selection de technologies de detection de defauts dans le bois de sciage* (M.Sc., Université Laval (Canada), Canada). <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=845769731&Fmt=7&clientId=43390&RQT=309&VName=PQD> (UMI No. MQ95139)
- Thomas, R. E., & Buehlmann, U. (2002). Validation of the ROMI-RIP rough mill simulator. *Forest Products Journal*, 52(2), 23-29.
- Thomas, R. E., & Weiss, J. (2006). Rough mill simulator version 3.0: An analysis tool for refining rough mill operations. *Forest Products Journal*, 56(Compendex), 53-58.
- Weiss, J., & Thomas, R. E. (2005). *ROMI-3: Rough-Mill Simulator Version 3.0: User's Guide* (General Technical Report NE-328). Newtown Square, PA: USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
- Wengert, E. M., & Lamb, F. M. (1994). *A handbook for improving quality and efficiency in rough mill operations: practical guidelines, examples, and ideas*. Princeton, WV: R. C. Byrd Hardwood Technology Center.
- Wiedenbeck, J. K. (2001). Deciding between crosscut vs rip first processing. *Wood and Wood Products, Août 2001*, 100-104.
- Yun, L. Y. (1989). *The margin for yield improvement for no. 1 common 5/4 red oak in a conventional rough mill*. (Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA).
- Zuo, X. (2003). *Improving lumber cut-up manufacturing efficiency using optimization methods* (Ph.D., North Carolina State University, Raleigh, North Carolina). <http://proquest.umi.com/pqdweb?did=764803571&Fmt=7&clientId=43390&RQT=309&VName=PQD> (UMI No. 3099041)
- Zuo, X., Buehlmann, U., & Thomas, R. E. (2003). Lumber Cost Minimization through Optimum Grade-Mix Selection. *Virginia Tech 17th International Conference on Production Research, Blacksburg, VA*. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute.
- Zuo, X., Buehlmann, U., & Thomas, R. E. (2004). Investigating the linearity assumption between lumber grade mix and yield using design of experiments (DOE). *Wood and fiber science*, 36(4), 547.